



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

STUDIUM ZMĚNY VLASTNOSTÍ PEROVSKITOVSKÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ ZA DOBU JEJICH ŽIVOTA

CHARACTERIZATION OF THE PEROVSKIT PHOTOVOLTAIC CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Tomáš Dvořák

ID: 144789

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Studium změny vlastností perovskitových fotovoltických článků za dobu jejich života

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou perovskitových fotovoltických článků, způsoby jejich přípravy a s možnostmi měření jejich zatěžovacích charakteristik. Seznamte se s dalšími metodami testování fotovoltických článků, především s metodou impedanční a fotoimpedanční spektroskopie a metodou měření kvantové účinnosti. Sestavte sadu perovskitových článků. Připravené články testujte na zařízení firmy Zahner vybranými statickými i dynamickými metodami. Výsledky vyhodnoťte z hlediska časových změn.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce pojednává o problematice perovskitových solárních článků. V úvodu se zabývá historií solárních článků, následně se věnuje jejich generacím, principu a také veličinám měřeným u fotovoltaických článků. V další části se práce zabývá perovskity, jejich vlastnostmi a strukturou. Navazuje část o perovskitových solárních článcích. Poslední část je věnována experimentům provedeným na vzorcích perovskitových solárních článků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaický článek, perovskit, struktura, účinnost, výkon, intenzita záření, frekvence.

ABSTRACT

The thesis is about the problematics of perovskite solar cells. The introduction deals with the history of the solar cells, next part is dedicated to their generations, the principle and also the variables measured in photovoltaic cells. The next part deals with perovskites, their properties and structure. The part about perovskite solar cells follows. The last part is dedicated to experiments executed on samples of perovskite solar cells.

KEYWORDS

Photovoltaic cell, perovskite, structure, efficiency, power, light intensity, frequency.

DVOŘÁK, T. *Studium změny vlastností perovskitových fotovoltaičských článků za dobu jejich života*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav Elektrotechnologie, 2017. 74 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Studium změny vlastností perovskitovských fotovoltaických článků za dobu jejich života“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vítězslavu Novákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	8
1. Teoretická část.....	9
1. 1. Fotovoltaické články	9
1. 2. Rozdělení fotovoltaických článků podle generace	10
1.2.1. První generace.....	10
1.2.2. Druhá generace	10
1.2.3. Třetí generace.....	11
1. 3. Princip fotovoltaických článků.....	12
1. 4. Veličiny měřené u solárních článků	13
1. 4. 1. Účinnost fotovoltaických článků	14
1. 4. 2. Výkon fotovoltaického článku	14
1. 4. 3. Faktor plnění (Fill Factor).....	14
1. 5. Struktura a vlastnosti perovskitů	15
1. 5. 1. Struktura perovskitů.....	15
1. 5. 2. Vodivost perovskitových materiálů	16
1. 5. 3. Elektronová vodivost perovskitů	16
1. 5. 4. Iontová vodivost perovskitů.....	17
1. 6. Perovskitové fotovoltaické články	18
1. 6. 1. Struktura perovskitových solárních článků.....	19
1. 6. 2. Způsob výroby perovskitu	19
1. 6. 3. Princip nanášení	21
2. Experimentální část	22
2. 1. Výroba solárních článků.....	22
2. 1. 1. Příprava roztoku perovskitu	22
2. 1. 2. Výroba solárních článků	26
2. 1. 3. Vyhodnocení	31
2. 2. Metody měření solárních článků	32
2. 2. 1. Příprava před měřením.....	32
2. 2. 2. Voltampérová charakteristika	33
2. 2. 3. Statické měření – proudová odezva v závislosti na intenzitě záření.....	43
2. 2. 4. Dynamické měření – fáze a proudová odezva v závislosti na frekvenci	50

2. 2. 5. Spektrální analýza	63
Závěr.....	66
Použitá literatura.....	68
Seznam obrázků	70
Seznam symbolů, veličin a zkratk	71
Seznam tabulek.....	72
Seznam grafů.....	73

Úvod

Fotovoltaika je v dnešní době již dobře známým tématem. Od realizace prvních fotovoltaických článků uběhla řada let a vývoj v tomto odvětví neustále pokračuje. Dochází k pokrokům jak ohledně konstrukce fotovoltaických panelů, tak v oblasti používaných materiálů. Jelikož patří fotovoltaické panely do skupiny obnovitelných zdrojů a ekologie se pro naši společnost stává čím dál důležitější, tak jejich význam neustále roste.

Fotovoltaické články jsou dnes většinou založeny na křemíkových polovodičích. Křemík s potřebnou kvalitou je však náročný a nákladný na výrobu. Křemíkové fotovoltaické články se navíc dostávají na hranici své účinnosti, proto probíhá výzkum fotovoltaických článků z nových materiálů, které by mohly dosahovat větší účinnosti a ušetřit náklady na materiál při jejich výrobě.

Mezi takové materiály můžeme řadit právě perovskit, mezi jehož hlavní výhody patří jeho jednoduchá příprava. Aby bylo dosaženo u perovskitu stejných výsledků jako u křemíkových fotovoltaických článků, stačí pouze vrstva jednoho mikrometru tohoto materiálu, kdežto u křemíku musela tato vrstva být několika set násobně silnější. Díky tomu je možné dosáhnout při výrobě výrazně nižších nákladů. Před zavedením do praxe je však nutné tyto články řádně otestovat.

Z tohoto důvodu se bude má práce zabývat studiem změny vlastností perovskitových fotovoltaických článků za dobu jejich života.

1. Teoretická část

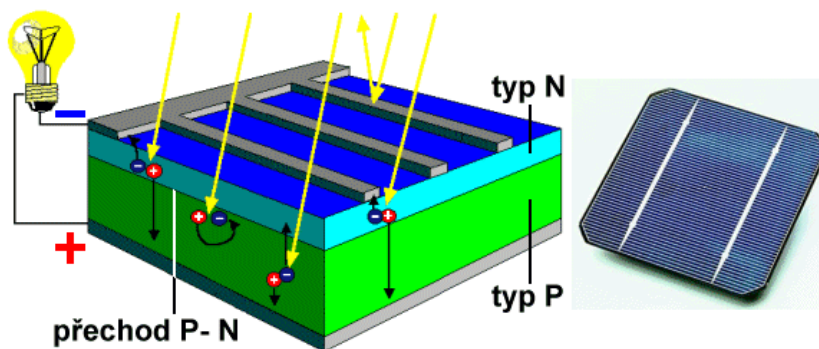
1.1. Fotovoltaické články

Význam fotovoltaických článků v posledních letech roste. Jejich účinnost se neustále navyšuje a tak je jejich pořízení a využívání výhodnější než v minulých letech.

Pojem fotovoltaika vyjadřuje přímou přeměnu energie slunečního záření na energii elektrickou. Tohoto principu bylo u solárních článků poprvé využito v roce 1883, ale vyšší účinnosti fotovoltaického článku (6 %) bylo dosaženo až v roce 1956 použitím monokrystalického křemíku. Významnější využití fotovoltaických článků bylo nejprve u kosmického programu, později se však prosadily i aplikace pro energetické účely.

Fotovoltaický článek je velkoplošná polovodičová součástka, která má alespoň jeden PN přechod. Článek je z přední strany vyroben tak, aby pohlcoval sluneční záření. Při dostatečné energii fotonů dochází k jejich interakci s polovodičem tak, že dojde k uvolnění vazebních elektronů a následnému vytvoření páru elektron-díra. Tento pár je poté oddělen vestavěným elektrickým polem PN přechodu. Na článku vznikne napětí a je možné odebírat proud, jehož velikost závisí na ploše článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření. Pro dosažení vyššího napětí jsou jednotlivé články spojovány do série (bloků).

Za dobu vývoje fotovoltaických článků bylo vyzkoušeno mnoho materiálů. Výzkum v této oblasti ovšem nadále pokračuje, jeho zaměření je, kromě již zmíněných materiálů, také na nové konstrukční principy. V současnosti se nejvíce vyrábí fotovoltaické články a moduly z krystalického křemíku. [1]



Obrázek 1 - Fotovoltaický článek [2]

1. 2. Rozdělení fotovoltaických článků podle generace

1.2.1. První generace

Jedná se o fotovoltaické články vyráběné z destiček monokrystalického křemíku, ve kterých je vytvořen velkoplošný P-N přechod. Výhodou tohoto typu článku je dobrá účinnost a dlouhodobá stabilita výkonu. Nevýhodou je náročnost výroby na množství velmi čistého a tedy i drahého křemíku, spolu s náročnou výrobou. V současnosti je to nejpoužívanější typ.

Jsou vyráběny z:

- monokrystalického křemíku,
- multikrystalického křemíku a
- polykrystalického křemíku.



Obrázek 2 - Fotovoltaický panel [3]

1.2.2. Druhá generace

Tento typ je význačný snahou snížit množství křemíku potřebného pro výrobu za pomoci tenkovrstvých článků a tím celkově zlevnit výrobu. Mezi nejběžněji používanými články jsou články z polykrystalického, mikrokystalického nebo amorfního křemíku. Hlavní nevýhodou tohoto typu je znatelně nižší účinnost a také menší stabilita účinnosti v čase. Tenkovrstvé články jsou prosazovány pro aplikace, kde je potřeba pružnost a ohebnost. Například jsou používány fólie, které se při rekonstrukci nalepí na střechu a slouží tak jako nepropustná fólie a zároveň vyrábí elektrickou energii.



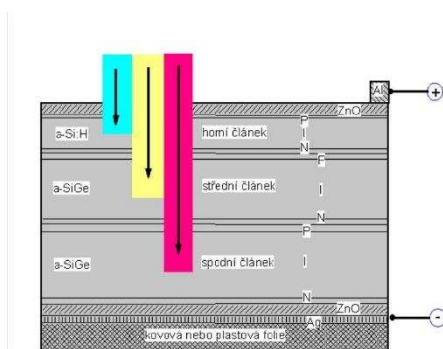
Obrázek 3 - Fotovoltaická fólie [4]

1.2.3. Třetí generace

Jako třetí generace jsou označovány články, které mají ambice způsobit revoluci ve fotovoltaice. U těchto článků je snaha maximalizovat počet absorbovaných elektronů, zefektivnit následný proces generace párů elektron-díra a také maximalizovat využití energie dopadajících fotonů. Existuje celá řada směrů, kterým je v tomto výzkumu věnována pozornost, například:

- Vícevrstvé solární články
- Články s vícenásobnými pásy
- Články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro větší generaci párů elektron-díra
- Termofotovoltaická přeměna, kde vystupuje absorbér současně jako radiátor vyzařující selektivně na jedné energii
- Články využívající kvantových jevů v kvantových jamách nebo tečkách
- Prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- Organické články

U této generace je však prozatím jediným komerčně dobře fungujícím případem konstrukce vícevrstvé struktury (dvojvrstvé – tandemy a trojvrstvé), z nichž každá vrstva (substruktura P-I-N) absorbuje určitou část spektra a tím maximalizuje energetickou účinnost fotonů.



Obrázek 4 - Trojvrstvý fotovoltaický článek [5]

1. 3. Princip fotovoltaických článků

Fotovoltaický článek je v podstatě polovodičová dioda, jejíž základ tvoří křemíková destička s vodivostí typu P. Na tuto destičku je při výrobě nanесena tenká vrstva polovodiče typu N, vrstvu P a N dělí P-N přechod. Pokud je článek osvětlen, vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev a z jeho krystalové mřížky se začnou uvolňovat elektrony. Na P-N přechodu se vytvoří napětí okolo 0,5 V, článek tedy mění energii dopadajícího světla na energii elektrickou. Pokud k článku připojíme zátěž, dojde k vyrovnávání kladného a záporného náboje a obvodem začne procházet elektrický proud. Při větší náročnosti na napětí nebo proud je možné zapojit jednotlivé články dohromady, a to buď sériově, nebo paralelně. [2]

1. 4. Veličiny měřené u solárních článků

Kromě veličin, které lze na fotovoltaickém článku měřit přímo (U_{oc} napětí naprázdno a I_{sc} proud nakrátko), charakterizují článek také jiné veličiny, mezi které patří například maximální výkon P_{mas} a účinnost η . Z hlediska kvality fotovoltaického článku je vhodné určit i další veličiny, pomocí kterých se dozvíme více o kvalitě fotovoltaického článku. Ke zjištění těchto parametrů je vhodné použít například V-A charakteristiku. Z této charakteristiky je možné určit přibližné hodnoty jak sériového odporu R_s , tak odporu paralelního R_{sh} . Pomocí těchto veličin lze vypočíst faktor plnění FF.

Pro solární články je důležité množství sluneční energie dopadající na povrch solárního článku. Mimo naši atmosféru je intenzita záření vyjádřena tzv. Sluneční konstantou a ta je rovna $I_0 = 1360 \text{ Wm}^{-2}$. Pro zjištění hodnoty slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický článek umístěný na zemském povrchu musí být uvažováno například se znečištěním atmosféry, odrazy od molekul plynů apod. Všechny tyto vlivy dohromady vyjadřuje součinitel znečištění Z . Pokud záření dopadá kolmo na určitou plochu, pak může být pro výpočet dopadající energie použit vzorec:

$$E_{PN} = E_0 \cdot A^{-Z} [\text{Wm}^{-2}; \text{Wm}^{-2}] \quad (1)$$

kde A je součinitel výšky Slunce nad povrchem.

TYP OBLASTI	SOUČINITEL ZNEČIŠTĚNÍ Z
Místa nad 2000 m.n.m.	2,0
Místa nad 1000 m.n.m.	2,5
Venkov bez průmyslových exhalací	3,0
Města a průmyslová střediska	4,0
Silně znečištěné prostředí	5,0

Tabulka 1 - Typické hodnoty znečištění

1. 4. 1. Účinnost fotovoltaiických článků

Pro výpočet účinnosti přeměny energie slunečního záření na energii elektrickou platí vztah:

$$\eta = \frac{U_{max} \cdot I_{max}}{A \cdot E} \quad (2)$$

Kde je	U_{max}	maximální napětí
	I_{max}	maximální proud
	E	intenzita slunečního záření
	A	plocha aktivní části článku

1. 4. 2. Výkon fotovoltaiického článku

Výkon fotovoltaiického článku se vypočte jako součin proudu a napětí. Každý článek má na své charakteristice pracovní bod, kde je výkon tohoto článku největší. Pro tento bod je užíváno označení bod maximálního výkonu (MPP) a odpovídá mu napětí U_{max} a proud I_{max} . Vztah pro výpočet výkonu fotovoltaiického článku je:

$$P = U_{max} \cdot I_{max} [W; V; A] \quad (3)$$

1. 4. 3. Faktor plnění (Fill Factor)

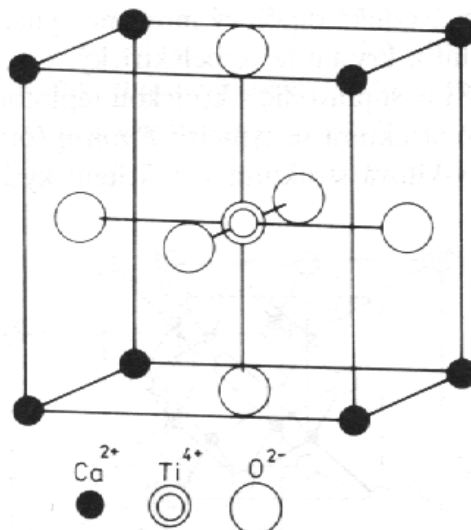
Faktor plnění je definován jako podíl maximálního výkonu (z předešlého odstavce) k maximálnímu výkonu definovanému za pomoci napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} . Vztah pro faktor plnění tedy je:

$$FF = \frac{U_{max} \cdot I_{max}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} [\%] \quad (4)$$

1. 5. Struktura a vlastnosti perovskitů

1. 5. 1. Struktura perovskitů

Označení perovskit se původně vázalo pouze k minerálu s chemickým složením CaTiO_3 , který má krystaly uspořádané v kosočtverečné krystalové soustavě. V současnosti se toto označení používá pro celou skupinu materiálů s obdobnou krystalovou strukturou nesoucí označení AMX_3 . [6]



Obrázek 5 - struktura CaTiO_3 [7]

Perovskity se mohou vyskytovat ve strukturách:

- **Romboendrická** BaTiO_3
- **Kubická** SrTiO_3 , SrSnO_3 , SrZrO_3 , BaSnO_3 , BaZrO_3 , BaThO_3 , BaTiO_3
ideální perovskitová struktura (teploty nad 120°C)
- **Tetragonální** BaTiO_3 při pokojové teplotě, dále PbTiO_3 , PbZrO_3
- **Ortorombická** CaTiO_3 , CaSnO_3 , CaZrO_3 , CdTiO_3
- **Monoklinická**
- **Rhomboedrická**

Tetragonální, monoklinická a rhomboedrická mohou za vyšších teplot přecházet do struktury kubické.

1. 5. 2. Vodivost perovskitových materiálů

Celková vodivost perovskitů se skládá z vodivosti elektronové a iontové, což je vyjádřeno v následující rovnici:

$$\sigma_{celk} = \sigma_{elektr} + \sigma_{iont} \quad (5)$$

nebo

$$\sigma_{celk} = \sum q_i \cdot \mu_i \cdot c_i \quad (6)$$

kde je	c_i	hustota nosičů
	q_i	náboj
	μ_i	mobilita

Při teplotě 800 °C se hodnota elektronové vodivosti pohybuje mezi 100 až 1000 S, hodnota iontové vodivosti je 10^{-2} . Z tohoto je patrné, že u perovskitů je iontová vodivost mnohonásobně nižší než elektronová vodivost.

1. 5. 3. Elektronová vodivost perovskitů

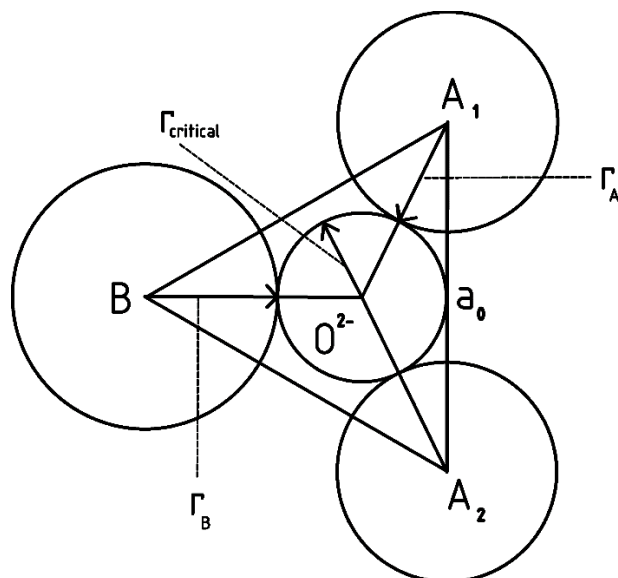
Při kolísání tepelného pohybu atomů v mřížkových uzlech dochází k porušení vazby mezi elektronem a atomem a tento elektron se stane volným. Pro uvolnění elektronu z kovalentní vazby musí tento elektron absorbovat aktivační energii E_a , která přesáhne velikost energie vazebné. To má za následek vznik neúplné vazby, která má přebytek náboje. Tuto nezaplňenou vazbu nazýváme díra. Takto nezaplňené valenční vazby mohou být obsazeny elektronem ze sousední vazby, ve které vznikne díra a tak to může pokračovat dále. Díra se tedy následkem výměny elektronu mezi atomy může volně pohybovat v krystalu. Elektrony se pohybují po nezaplňených vazbách ve směru opačném ke směru pohybu děr, krystal ovšem jako celek zůstává elektricky neutrální, každé díře totiž odpovídá volný elektron. Koncentrace volných elektronů a děr je stejná, jejich pohyblivost je však odlišná. Pohyblivost děr bývá nižší než pohyblivost elektronů. Pokud zvyšujeme teplotu, pak dochází i k růstu koncentrace nosičů elektrického náboje. Vlastní koncentrace elektrického náboje při stejné teplotě je závislá na velikosti aktivační energie a to tak, že čím je nižší aktivační energie, tím vyšší bude vlastní koncentrace elektrického náboje. Aktivační energie může být vypočítána za pomoci Arrheniovy rovnice, pomocí které je vyjádřena teplotní závislost elektronové vodivosti. [8]

$$\sigma_{elektr} = \frac{A_m}{k \cdot T^3} \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T}\right) \quad (7)$$

Kde je	A_m	materiálová konstanta
	E_a	aktivační energie
	k	Boltzmanova konstanta
	T	absolutní teplota

1. 5. 4. Iontová vodivost perovskitů

Tento druh vodivosti je způsoben difúzí iontů O^{2-} . Kyslíkový iont migruje přes takzvaný sedlový bod, který je tvořen dvěma ionty (jedním A a jedním B).



Obrázek 6 - Sedlový bod v perovskitech a definice i význam Kilnerova kritického poloměru r_{krit}

Podle rovnice níže je r_{krit} definován:

$$r_{krit} = \frac{r_a + \frac{3}{4} \cdot a_0^2 - \sqrt{2} \cdot a_0 \cdot x \cdot r_b + r_b^2}{2 \cdot r_a} + \sqrt{2} \cdot a_0 - 2 \cdot r_b \quad (8)$$

Kde je

r_a, r_b

poloměr prvku A a B

a_0

vzdálenost atomů A

U velké části perovskitů se objevuje iontová vodivost, kterou je možné prakticky využít v různých zařízeních, mezi které patří například SOFC a kyslíkové senzory. Kritický poloměr, jakožto strukturní parametr, udává velikost iontové vodivosti.

Na základě výzkumu bylo zjištěno, že kyslíkový iont musí při pohybu projít přes mezeru, která je ohraničena třemi kationty (obr. 6). Tato mezeru má poloměr r_{krit} , který je nazýván kritickým poloměrem. Pro kubické perovskity byla hodnota r_{krit} vypočtena na $\leq 0,105$ nm, tato hodnota je nižší než hodnota iontového poloměru aniontu kyslíku, která je 0,140 nm. Díky tepelným vibracím kationtů je pro kyslíkový iont možné projít skrz mezeru s kritickým poloměrem. Termální pohyby (jejich rozsah) rostou nepřímo úměrně s druhou mocninou iontové hmotnosti, z čehož plyne, že by měla iontová vodivost klesat s rostoucí hmotností kovových iontů. Dalším důležitým parametrem je polarizovatelnost krystalové mřížky, u které platí, že čím je vyšší, tím je pro kyslíkový iont jednodušší projít skrz mřížku. [8]

1. 6. Perovskitové fotovoltaické články

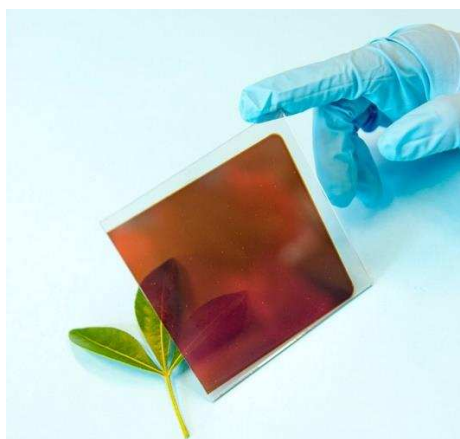
Perovskitové fotovoltaické články zažily v posledních letech velký pokrok a díky tomu, že mohou být vyrobeny mnohem levněji než křemíkové fotovoltaické články, by se mohly stát již v blízké budoucnosti jejich velkým konkurentem.



Obrázek 7 – Perovskit [9]

U křemíkových fotovoltaických článků docházelo k nárůstu účinnosti velmi pozvolně a zastavila se zhruba na 25 % (ne v běžném provozu). U perovskitových solárních článků je doposud nárůst účinnosti velice rychlý. Prvotní účinnost perovskitových článků byla mnohonásobně nižší než u křemíkových článků. V roce 2009 se pohybovala účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou perovskitových článků, složených z olova, jodidu a methylamonia, pod 4 %.

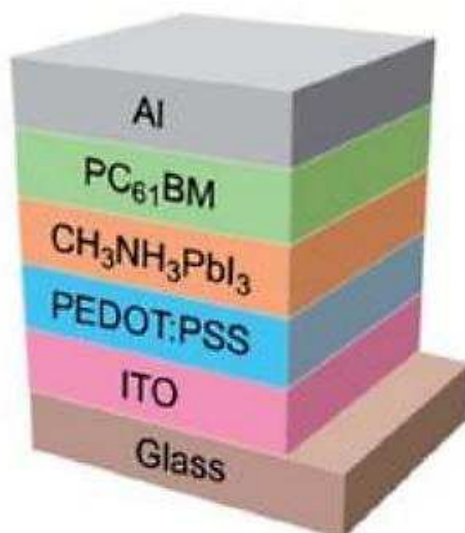
Díky velkému množství kombinací perovskitů (jejich chemického složení) došlo od roku 2009 ke značnému zlepšení. V současnosti přesahuje jejich účinnost 20 %, což je pětinašobný nárůst za 7 let. Tento pokrok tedy učinil perovskitové solární články konkurenceschopné článkům křemíkovým, na rozdíl od křemíkových článků zde však lze očekávat další zlepšování účinnosti. [10]



Obrázek 8 - perovskitový solární článek [11]

1. 6. 1. Struktura perovskitových solárních článků

Jako základ pro perovskitové solární články slouží skelný substrát potažený ITO vrstvou (směs materiálů, které dohromady tvoří vysoce vodivý materiál). Na tento substrát je nanесena vrstva PEDOT:PSS (transparentní antistatická vodivá vrstva). Další vrstvou je $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, na který je nanесena vrstva PC_{61}BM . Nakonec je na aktivní vrstvu nanесena katoda.



Obrázek 9 - Struktura perovskitového solárního článku [12]

1. 6. 2. Způsob výroby perovskitu

Perovskit je možné vyrobit jedním ze čtyř níže uvedených způsobů.

Nanášení v jednom kroku (One-step Precursor Deposition – OSPD)

Pro tento postup obecně platí smíchání práškové směsi RAX kde:

RA: methyl, amonium nebo formamidinium

X: I, Br

se směsí PbX_2 kde:

X: I, Br, Cl

v molárním poměru 1:1 pro stechiometrii nebo 3:1 pro nestechiometrii. Tuto směs dále rozpustíme v polárním rozpouštědle (DMF, DMAc, DMSO, NMP, GBL apod.) s vysokou hodnotou bodu varu. Tento roztok udržujeme po dobu několika hodin na zvýšené teplotě, aby byl roztok čirý.

Tento roztok je použit pro vytvoření halogenid – perovskitu. Roztok je nanесen buď pomocí rotační metody, nebo pomocí nástřiku na n-typ kontaktní vrstvy. Po tomto kroku musí být provedeno žihání, která zaručí úplnou transformaci na perovskitový krystalický film. Následuje přiložení horní tenké vrstvy.

Tato metoda je díky své jednoduchosti jedna z neoblíbenějších.

Způsob postupného nanášení (Sequential Deposition Method – SDM)

Pro tuto metodu je typické nanesení filmu PbI_2 rozpuštěného v DMF rozpouštědle pomocí odstředivého nanášení do nanoporézní struktury TiO_2 , která je poté transformována do perovskitu ponořením do roztoku methyl-amonium-jodidu v isopropanolu. Při styku obou složek v nanoporézní struktuře vzniká okamžitě perovskit. Dalším krokem je žíhání a nanesení tenké vrstvy HTM pomocí odstředování.

Díky tomu, že je postup dvoufázový, je možné mnohem lépe kontrolovat perovskitovou strukturu (oproti nanášení v jednom kroku). Tato metoda výroby fotovoltaických článků tedy značně vylepšuje reprodukovatelnost výsledků.

Nanášení dvojitém napařováním (Dual-Source Vapor Deposition – DSVD)

Tenkovrstvé perovskity vyrobené za pomoci napařování ve vakuu byly poprvé vyzkoušeny A. M. Salauem. Následovali ho D. D. Mitzi a poté v roce 2013 M. Z. Liu, který upravil podmínky depozice a pro přípravu tenkého filmu směsi halogenidů perovskitu, jako absorbní vrstvy v solárních článcích, použil napařovací techniku. Na základě výzkumu bylo zjištěno, že při nanesení této vrstvy napařením mají tyto vrstvy přesné měřítko a neobsahují mezery (nebo nerovnosti na povrchu).

Vzhledem k tomu, že je materiál napařován za nízkých teplot, je možné tento způsob aplikovat i na flexibilní a plastové materiály.

Napařovací proces (Vapor-Assisted Solution Process – VASP)

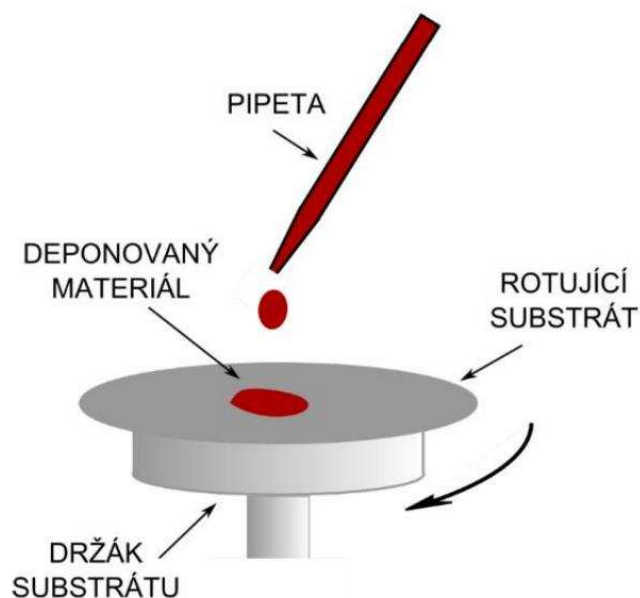
Tento proces zahrnuje nanášení vrstvy PbI_2 dopované fluorem a oxidem cínu na FTo sklo, které je potaženo kompaktní TiO_2 vrstvou. Po nanesení vrstvy následuje žíhání při teplotě $150\text{ }^\circ\text{C}$ v dusíkové atmosféře po dobu 2 hodin, což doprovází vznik perovskitové struktury.

Takto vytvořená perovskitová struktura se vyznačuje plným pokrytím povrchu spolu s jednotnou strukturou. Tato metoda představuje jednoduchý, kontrolovatelný a také univerzální postup k dosažení výsledné vysoce kvalitní perovskitové vrstvy s vysokým výkonem. [12]

1. 6. 3. Princip nanášení

Materiál je nanášen pomocí metody Spin Coating, neboli odstředivého nanášení. Tento způsob nanášení tenkých uniformních vrstev (organických, anorganických a směsných materiálů) na ploché substráty je velmi rozšířený a vysoce reprodukovatelný. Tato technologie nanášení tenké vrstvy se řadí mezi ty, které využívají kapalnou fázi, jelikož nanášený materiál je rozpuštěn ve vhodně zvoleném rozpouštědle.

Princip odstředivého nanášení spočívá v nanášení předem definovaného objemu materiálu na střed substrátu, který je umístěn na držáku v horizontální poloze (obr. 10). Odstředivé síly působící při rotaci substrátu mají poté za následek, že materiál, který je původně pouze ve středu substrátu, se rovnoměrně rozloží po povrchu substrátu, kde vytvoří tenkou vrstvu. Podle nastavení parametrů jako jsou rychlost otáčení, tekavost rozpouštědla, akcelerace otáčení, viskozita atd. lze připravit vrstvy, které mohou mít tloušťku menší než 10 nm. [13]



Obrázek 10 - Princip rotačního nanášení [13]

2. Experimentální část

2. 1. Výroba solárních článků

Při výrobě solárních článků byly vyrobeny tři série, u kterých byl opakován stejný postup výroby. První série článků ovšem nevykazovala dobré výsledky a tak ji nebylo možné měřit. Lepších výsledků bylo dosaženo u druhé série, která byla zvolena pro studium časových změn v perovskitových solárních člancích.

2. 1. 1. Příprava roztoku perovskitu

Jako první bylo zapotřebí vyčistit novou kádinku za pomoci DEMI (demineralizovaná) vody a isopropylalkoholu, po vyčištění byla kádinka vložena do sušičky. Dále byla očištěna fazolka (sloužící pro míchání roztoku) za pomoci DEMI vody.

Poté co byla kádinka a fazolka očištěna, bylo pomocí dvousekční pipety nalito do kádinky 5 ml DFM roztoku. V tomto okamžiku byla v místě vztlínání kapaliny vytvořena ryska a DFM roztok byl vylit do „DFM odpadu“.

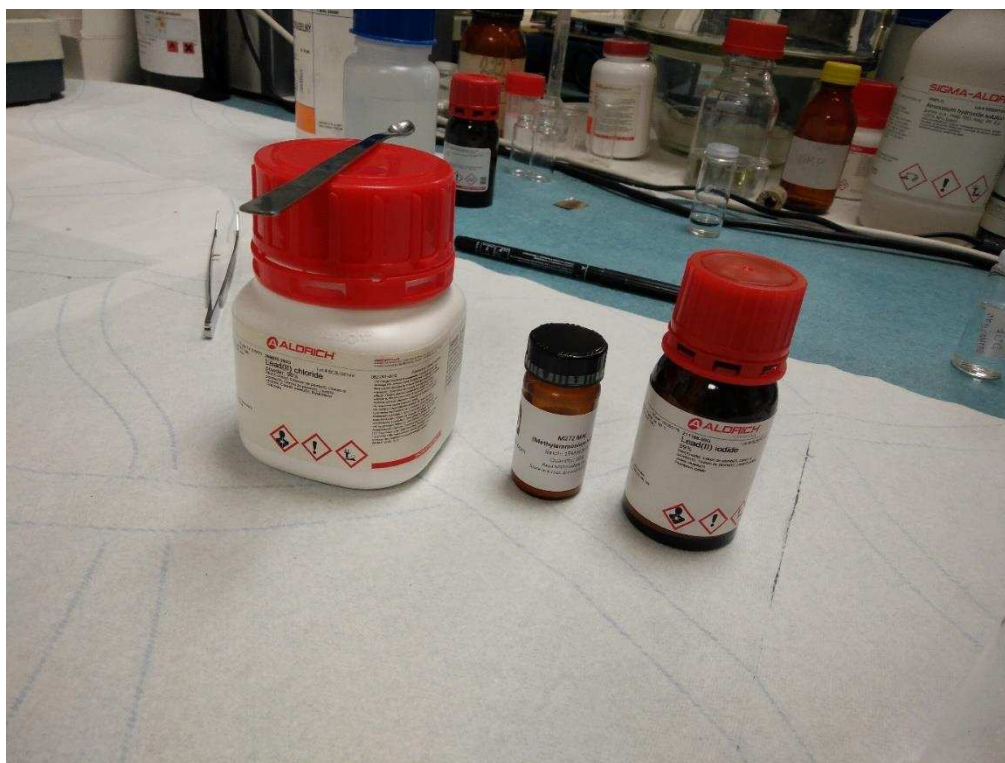
Pro navážení požadovaných hmotností jednotlivých složek roztoku byla vytvořena vanička z alobalu, jehož lesklá strana byla umyta DEMI a izopropylalkoholem a následně byl alobal vysušen.



Obrázek 11- Odvažování složek

Po vytvoření vaničky bylo pomocí váhy SL 234 odváženo požadované množství jednotlivých složek, množství daných složek je uvedeno níže (přesnost odvážení jednotlivých složek musela být dodržena na nejméně 4 desetinná čísla):

- 0,19561 g $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$
- 0,0855 g PbCl_2
- 0,141822 PbI_2



Obrázek 12 - Složky potřebné pro namíchání roztoku perovskitu

Na obrázku 12 jsou chemikálie potřebné pro přípravu roztoku perovskitu, a to zleva prášková podoba PbCl_2 (chlorid olovnatý), prášková podoba MAI (methyl amonium jodid $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$) a prášková podoba PbI_2 (jodid olovnatý).

Po navážení byly dané složky nasypány do kádinky a zbytky z alobalu byly spláchnuty za pomoci DFM tak, aby byly zachovány co nejpřesnější hmotnosti.

Do pipety bylo následně nabráno 4,5 ml DFM roztoku (v kádince se již nacházel určitý objem) a tento roztok byl poté naléván po stěnách kádinky, aby došlo ke smytí možných zbytků ze stěn kádinky. Takovýmto způsobem byl roztok naléván do kádinky, po dobu než bylo dosaženo rysky 5 ml.



Obrázek 13 - Smívání zbytků z lodičky do kádinky

V tomto bodě byla do kádinky s roztokem vložena fazolka a následně byla kádinka napuštěna dusíkem, který je nekontaktní (těžší než vzduch, drží se v kádince), takto napuštěná kádinka byla uzavřena.

Kádinka byla v tomto bodě označena a položena na plotýnku, která byla vyhřátá na 70 °C. Otáčky přístroje byly nastaveny na 700 rpm. Těchto otáček muselo být dosaženo pomalu, jinak by mohlo dojít k rozbití kádinky. Takto byla kádinka nechána po dobu 12 hodin.



Obrázek 14 - Míchání roztoku perovskitu

Mimo námi namíchaný roztok byl u první série použit také roztok kupovaný od firmy Ossila, tento roztok měl označení I201.



Obrázek 15 - Průmyslový roztok perovskitu

2. 1. 2. Výroba solárních článků

Pro nanesení perovskitového materiálu a samotnou výrobu solárních článků bylo nutné využít čistých prostor. Tyto prostory byly poskytnuty v budově CEITECU a na chemické Fakultě VUT.

Po namíchání roztoku bylo možné přejít k jeho nanesení a tedy samotné výrobě solárních článků. Jako první byla na chemické fakultě vyzvednuta sklíčka s naneseným PEDOTem. Po přenesení vybavení na CEITEC bylo možno začít se samotnou výrobou.



Obrázek 16 – Glovebox na CEITECu

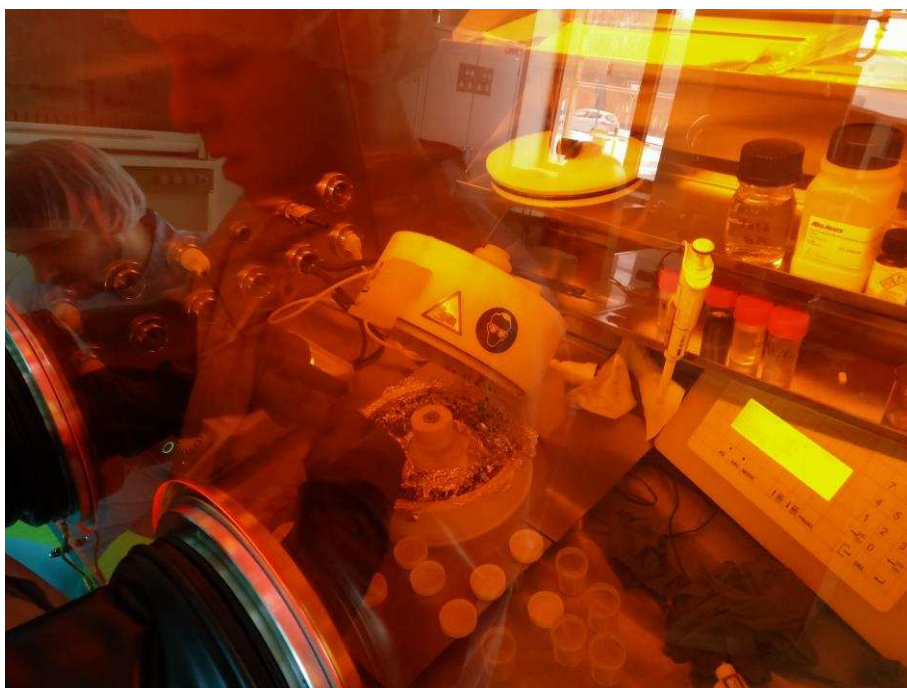
Všechny práce dále probíhaly v gloveboxu. V gloveboxu byla sklíčka položena na plotýnku, která byla nastavena na 100 °C. Zde byla sklíčka ponechána 5 minut, tím bylo docíleno odpaření přebytečné vlhkosti z povrchu PEDOTu. Vysušená sklíčka byla přesunuta na petriho misku. Teplota plotýnky byla poté snížena na 80 °C.

Následně byl nastaven spincoater na zrychlení 320 rpm s konečnou rychlostí otáčení 3000 rpm a dobou 40 s.



Obrázek 17 - Sklíčka na vyhřáté ploténce

Po dokončení přípravy bylo pomocí pipety naneseno 40 μl buď vytvořeného roztoku $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{Cl}_2$ nebo roztoku kupovaného. Nanášení bylo prováděno na spincoateru, čímž bylo dosaženo jak rovnoměrného rozprostření roztoku, tak odstředění roztoku přebytečného.



Obrázek 18 - Spincoater a rozmístění v gloveboxu

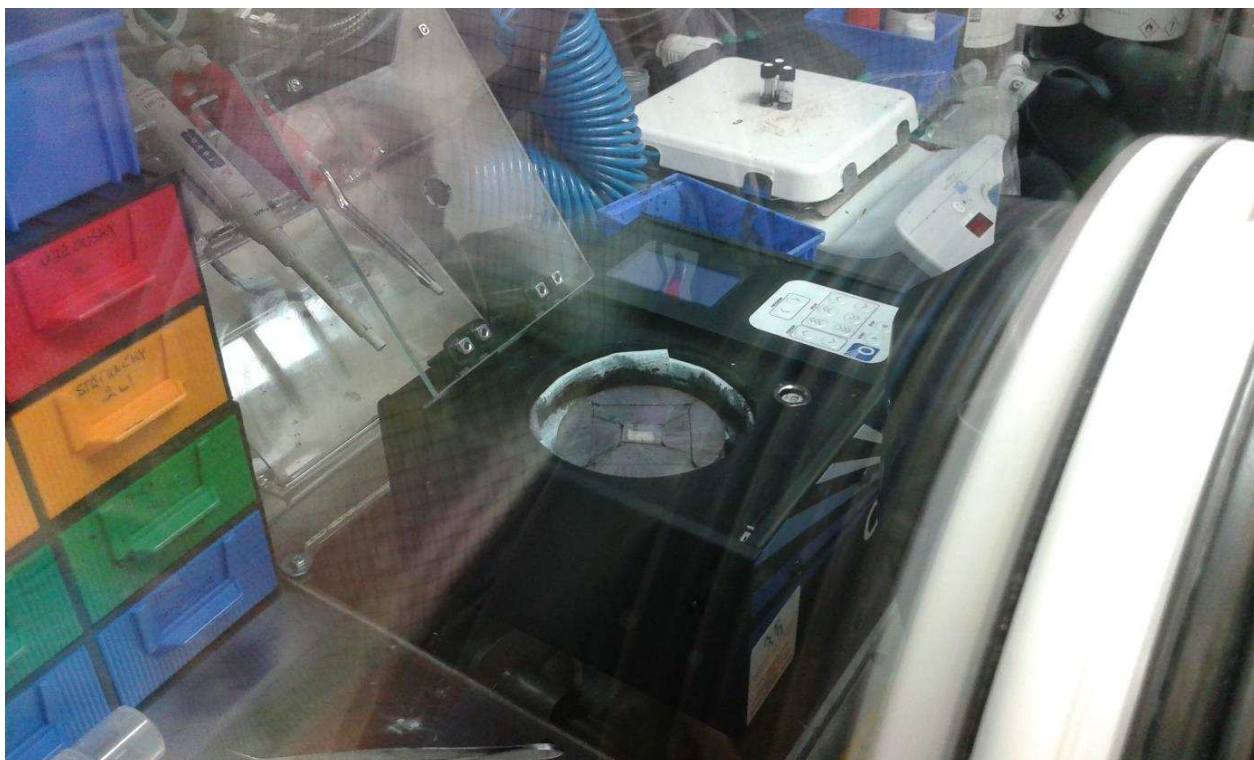
Po nanesení dané vrstvy byla sklíčka položena na předehřátou ploténku (80 °C), na které probíhalo žíhání po dobu v rozmezí od 30 do 60 s. Doba byla závislá na změně barvy povrchu sklíčka, což bylo přes oranžové sklo gloveboxu poměrně obtížné rozpoznat. Vzorky měly být sejmuty z plotny po ztmavnutí celé jejich plochy, aby nedošlo k jejich přepálení.

Sklíčka v tomto stádiu byla poté vložena do lahviček a uzavřena, aby byl možný jejich přenos do čistých prostor na chemické fakultě, kde výroba pokračovala.



Obrázek 19 - Glovebox na chemické fakultě

Na chemické fakultě bylo přistoupeno k nanesení PCB vrstvy. Sklíčka byla opět umístěna do gloveboxu, kde byla za pomoci spincoateru a pipety nanесena vrstva PCB. Pipeta byla nastavena na 20 μl a spincoater na 1000 rpm.



Obrázek 20 - Spincoater se sklíčkem ve středu

Po nanesení této vrstvy bylo nutné vyčistit na sklíčku katodový pruh, k čemuž byl využit chloroform a vatová tyčinka.



Obrázek 21 - Čištění katodového pruhu

Po vyčištění katodového pruhu byla sklička vložena do přípravku určeného pro napařování hliníkových elektrod. Tento přípravek byl poté vložen do napařovací komory, kde došlo k napaření elektrod.



Obrázek 22 - Napařovací aparatura

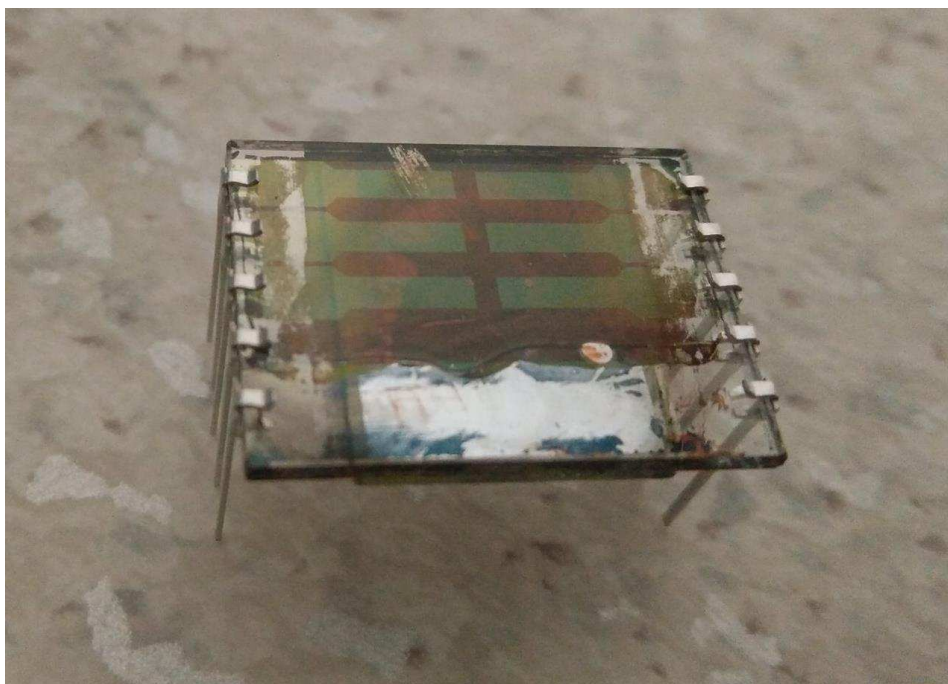
Po napaření hliníkových elektrod bylo přistoupeno k enkapsulaci, ta probíhala nanesením kapky epoxidu do středu skla a přiložením krycího sklíčka tak, aby bylo uprostřed. Takto přichystaná skla byla umístěna pod UV světlo, za pomoci kterého došlo k vytvrzení aplikovaného epoxidu.

Po uplynutí cca 30 minut pod UV světlem byl epoxid vytvrzený a články mohly být očištěny od zbylých nečistot. Na takto připravené články byly poté nasazeny kontakty a článek tak byl připraven pro měření.

2. 1. 3. Vyhodnocení

Celkem byly vyrobeny tři série perovskitových solárních článků, z těchto článků měly nejlepší výsledky solární články ze série druhé. U druhé série již byl opraven spincoater na fakultě chemické a nebyl tak nutný přenos vzorků mimo čisté prostory během výroby.

Postup výroby byl u všech sérií stejný, změnil se pouze krok, kdy bylo nutné přenést solární články z CEITECu na chemickou fakultu a došlo pouze na posun solárních článků mezi jednotlivými gloveboxy, což mohlo mít za následek markantní navýšení účinnosti. Z takto vyrobených článků byly vybrány nejlepší pro měření.



Obrázek 23 - Výsledný perovskitový solární článek

2. 2. Metody měření solárních článků

Veškerá měření byla provedena na přístroji CIMPS, v počítačovém programu THALES USB. Pro měření bylo využito dvou světelných zdrojů.

Prvním z nich byl zdroj s označením WLR02 s/n LS 1367, který obsahoval širokopásmovou bílou LED diodu. Při zapojení tohoto zdroje bylo zapotřebí zapojit také senzor, který měřil intenzitu dopadajícího záření. Na tomto zdroji byly změřeny voltampérové charakteristiky, statické měření, dynamické měření cimps, cimvs a elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS).

Druhým zdroj, s označením TLS03 1366, obsahoval monochromatické diody, které umožnily proměřit spektrum článku od vlnové délky 290 nm po vlnovou délku 1090 nm, což pokrývá oblast od ultrafialové po infračervenou. Při tomto měření nebylo na rozdíl od předchozího zdroje zapotřebí připojit ke zdroji senzor, vzorek byl totiž umístěn do prostoru co nejbližší zdroji světelného paprsku (1 mm). Na tomto zdroji byla naměřena spektrální analýza solárních článků.

V následující části budou popsány jak postupy pro umístění vzorků a postupy pro jednotlivá měření, tak jejich výsledky. Pro porovnání jsou v následující části jako první uvedeny výsledky naměřené u vzorků, které jsou víc jak rok staré.

2. 2. 1. Příprava před měřením

Aby bylo možné správně měřit, je zapotřebí, aby byly prvky přístroje umístěny v daných vzdálenostech. K dodržení vzdáleností slouží pravítko, které bylo k přístroji přiloženo od výrobce. Podle návodu od výrobce se dle orientace pravítka nastaví například vzdálenost senzoru od fotovoltaiického článku atd.



Obrázek 24 - Pravítko dodané spolu s přístrojem

Po nastavení daných vzdáleností může být fotovoltaický článek připojen k hlavnímu potenciostatu. Dále může být zapojen světelný zdroj, k tomu slouží zapojení k potenciostatu a také senzoru pro zpětnou vazbu. Poté lze zapnout přístroje a přejít k měření.



Obrázek 25 - Výsledné zapojení pro měření

2. 2. 2. Voltampérová charakteristika

Voltampérová charakteristika určuje závislost proudu na napětí. Charakteristika začíná v bodě U_{OC} napětí naprázdno, které udává velikost napětí na svorkách bez připojené zátěže, je to tedy maximální možné napětí na článku. Charakteristika je poté proměřena až po bod I_{SC} proud nakrátko, což je fyzikálně největší možný protékající proud článku.

Na voltampérové charakteristice se nachází pracovní bod. Jde o bod, ve kterém fotovoltaický článek právě pracuje a je závislý na vlastnostech odběru proudu a napětí měřeného článku a je také výrazně závislý na teplotě. Snahou je, aby poloha pracovního bodu byla totožná s polohou bodu maximálního výkonu (MPP – Maximal Power Point), ve kterém má článek největší dodávaný výkon.

Pro proměření voltampérové charakteristiky byly nastaveny parametry programu na základě manuálu k přístroji.

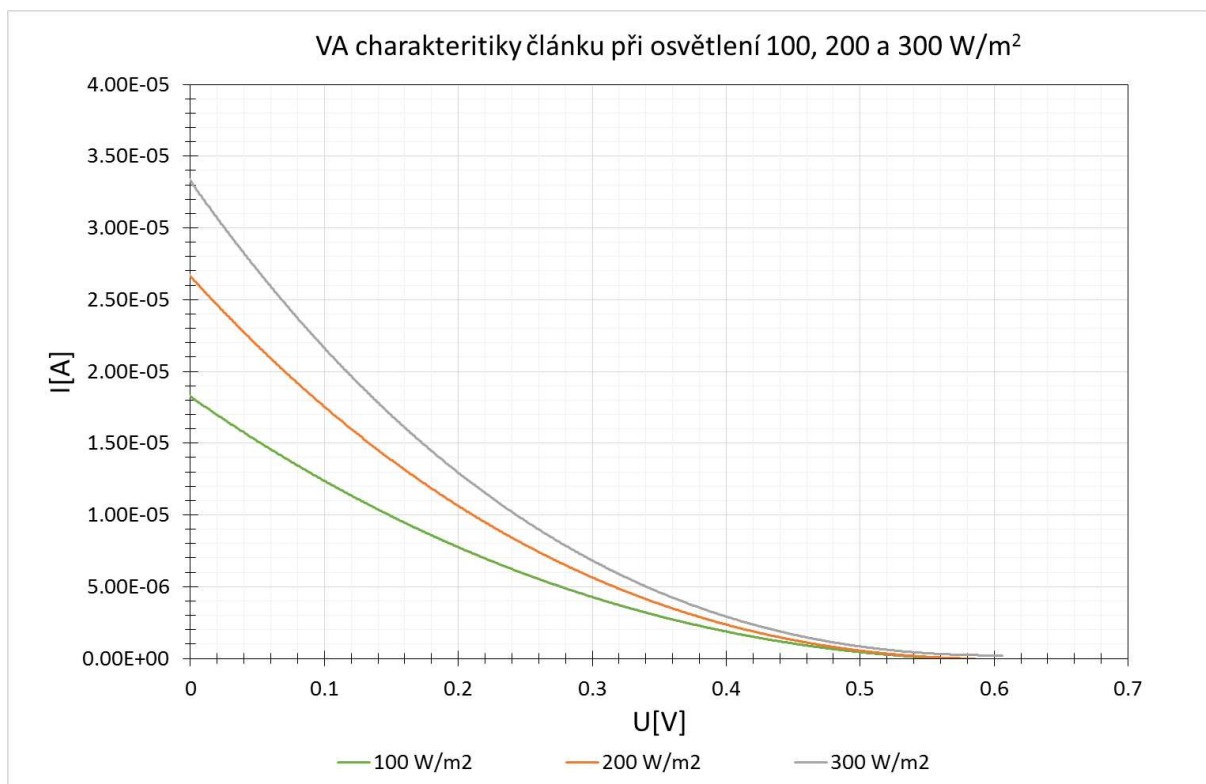
Zdroj byl postupně nastaven na intenzitu osvětlení 50, 100, 150, 200, 250, 300 a poté 350 W/m². Zdroj by měl dovolovat intenzitu až 420 W/m², ale při této intenzitě docházelo k jeho vypínání.

Výsledky starších vzorků

U starších vzorků byly hodnoty měřeny pouze pro intenzitu osvětlení 100, 200 a 300 W/m².

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty VA při různých intenzitách osvětlení – starší vzorky

E [W/m ²]	U_{OC} [V]	I_{SC} [μA]	P_{max} [μW]	U_{max} [V]	I_{max} [μA]	Fill Factor
100	0.614	-18.05	1.553	0.188	-8.282	0.14
200	0.586	-26.36	2.137	0.181	-11.81	0.138
300	0.606	-32.89	2.606	0.179	-14.58	0.131



Graf 1 - Voltampérové charakteristiky

Z grafu je patrné, že závislost neprobíhá jako u standardního solárního článku, ale spíše exponenciálně klesá. To je nejspíš způsobeno stářím tohoto perovskitového článku, který již degradoval.

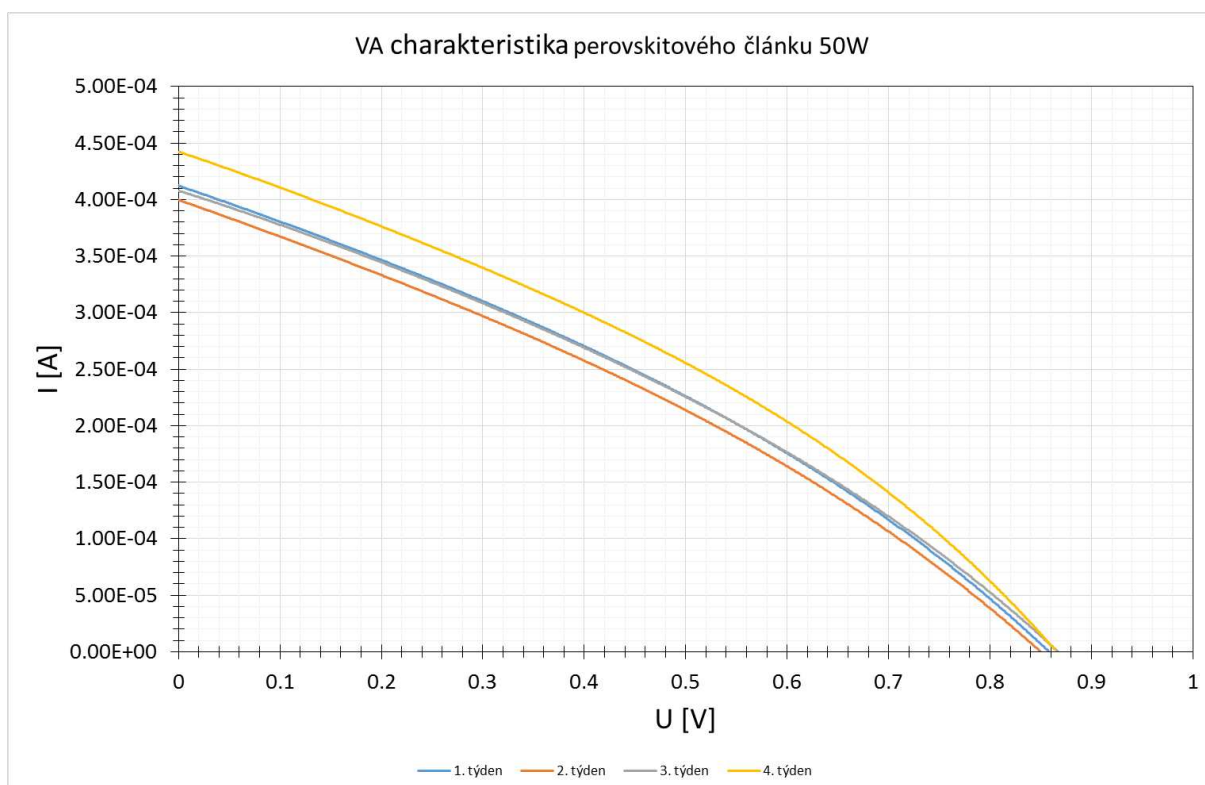
Výsledky nových vzorků

Výsledky nových vzorků jsou nejprve prezentovány v tabulce naměřených významných veličin a poté zobrazeny v grafech. V grafech můžeme vidět změny křivek při narůstající intenzitě, kdy dochází k nárůstu všech parametrů.

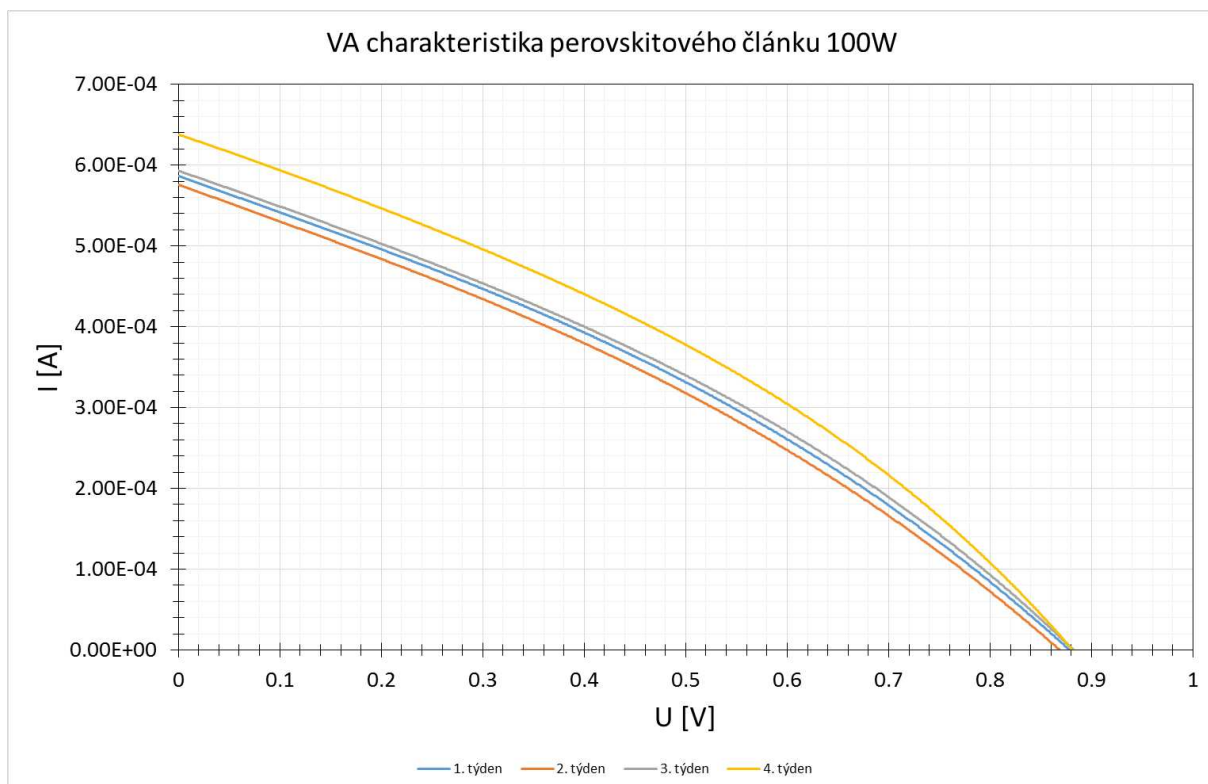
Tabulka 3 – Příklad naměřených hodnot VA při různých intenzitách osvětlení – novější vzorky

E [W/m ²]	U _{OC} [V]	I _{SC} [mA]	P _{max} [μW]	U _{max} [V]	I _{max} [μA]	Fill Factor
50	0.849	-0.498	133.8	0.491	-272.3	0.317
100	0.872	-0.700	194.8	0.505	-385.6	0.319
150	0.884	-0.856	244.0	0.509	-479.7	0.322
200	0.892	-0.998	289.4	0.509	-568.4	0.325
250	0.898	-1.126	329.4	0.503	-655.4	0.326
300	0.903	-1.248	367.3	0.512	-717.3	0.326
350	0.907	-1.366	403.8	0.506	-797.8	0.326

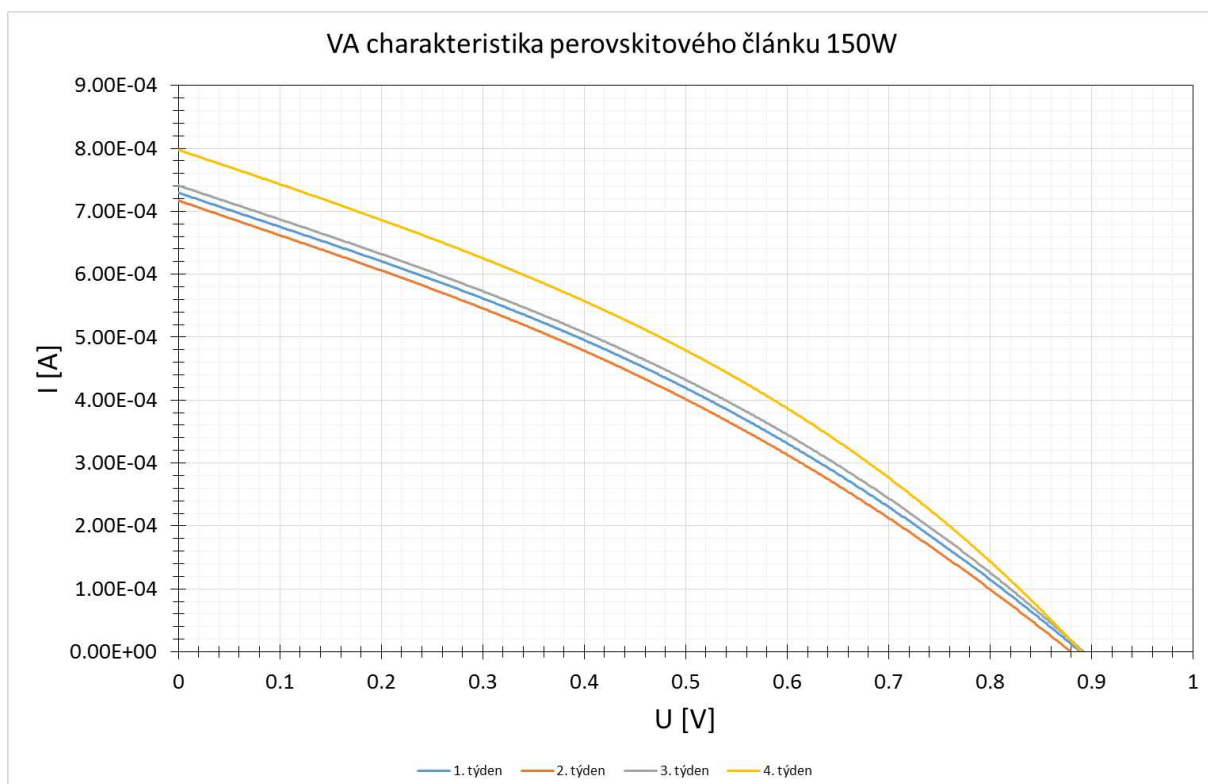
V následujících grafech jsou křivky značeny jako 1. týden až 4. týden, jednotlivá měření jsou s týdenním odstupem. Pro znázornění rozdílů mezi jednotlivými intenzitami osvětlení byl vybrán vzorek 5 a elektroda 5.



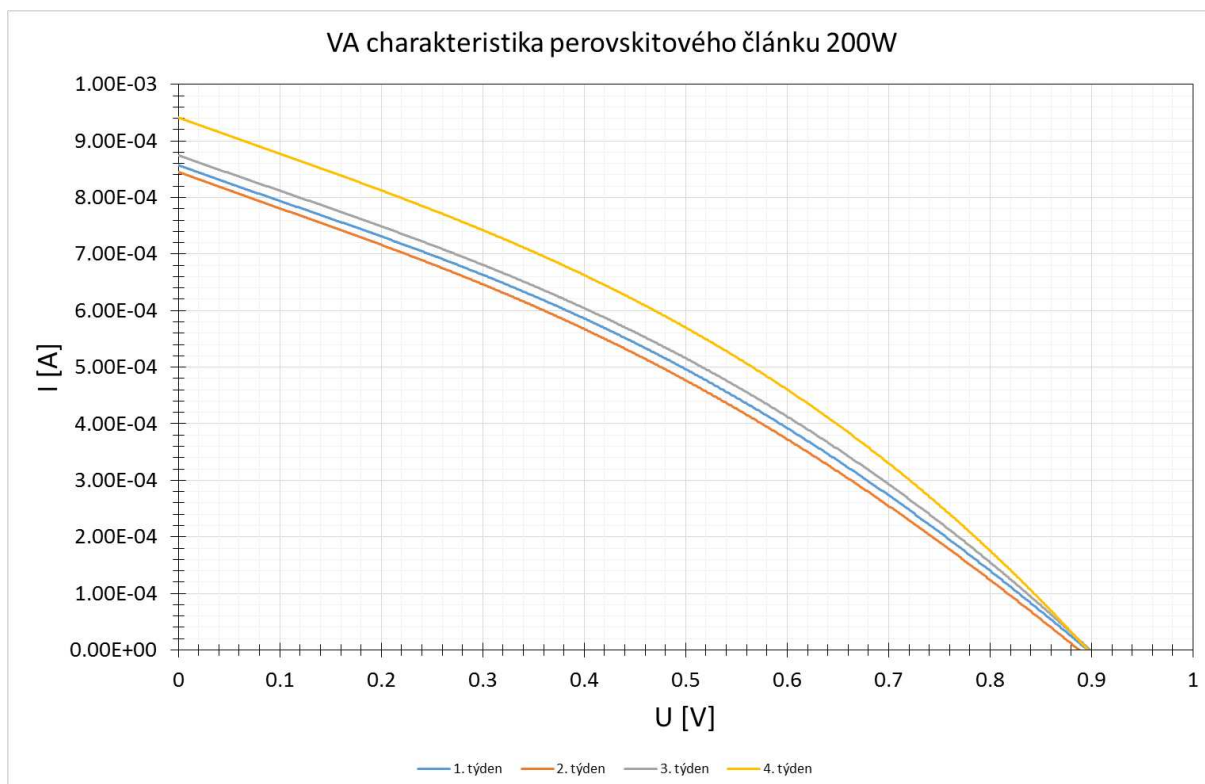
Graf 2 - Voltampérové charakteristiky 50 W – vzorek 5, elektroda 5



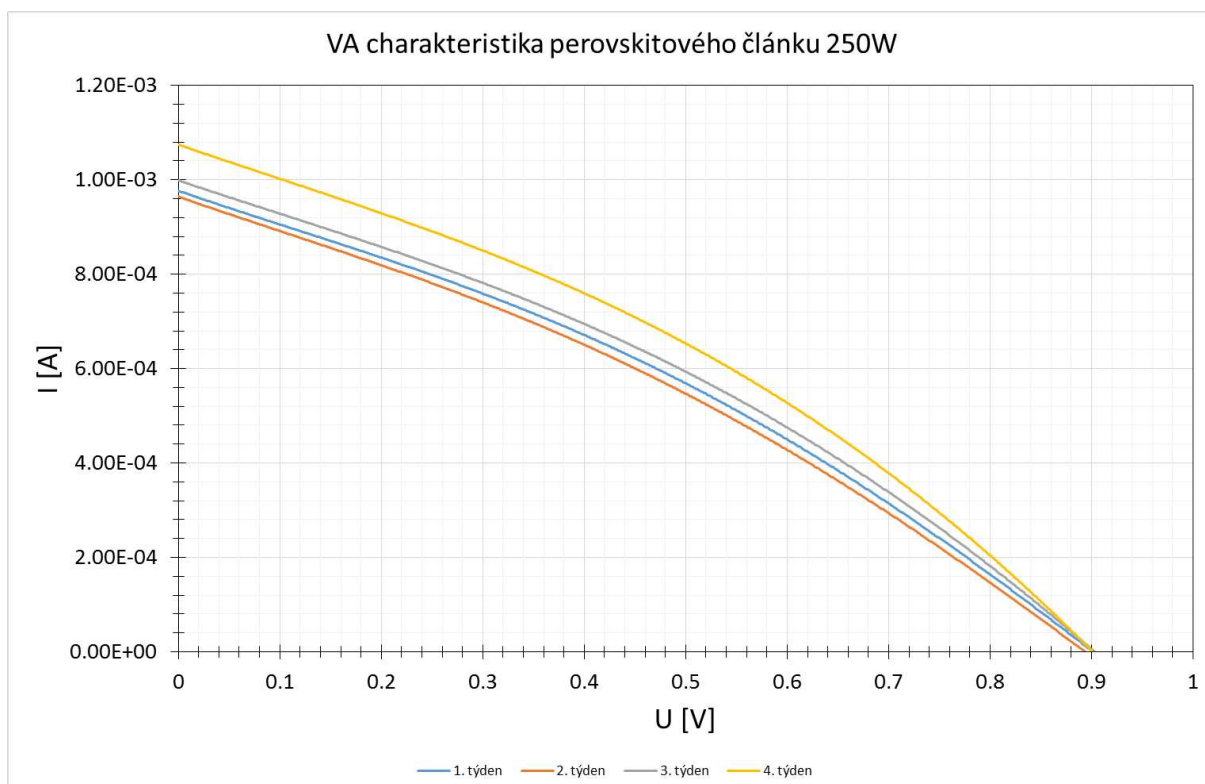
Graf 3 - Voltampérové charakteristiky 100 W – vzorek 5, elektroda 5



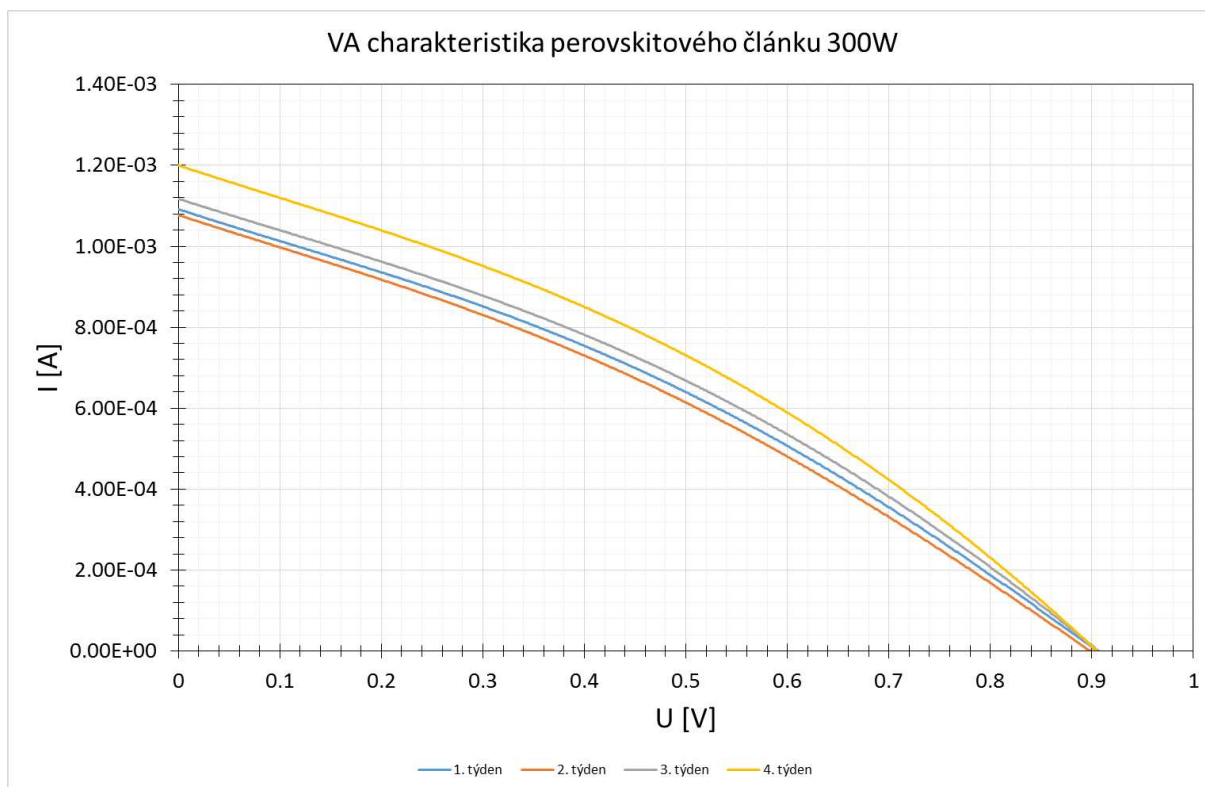
Graf 4 - Voltampérové charakteristiky 150 W – vzorek 5, elektroda 5



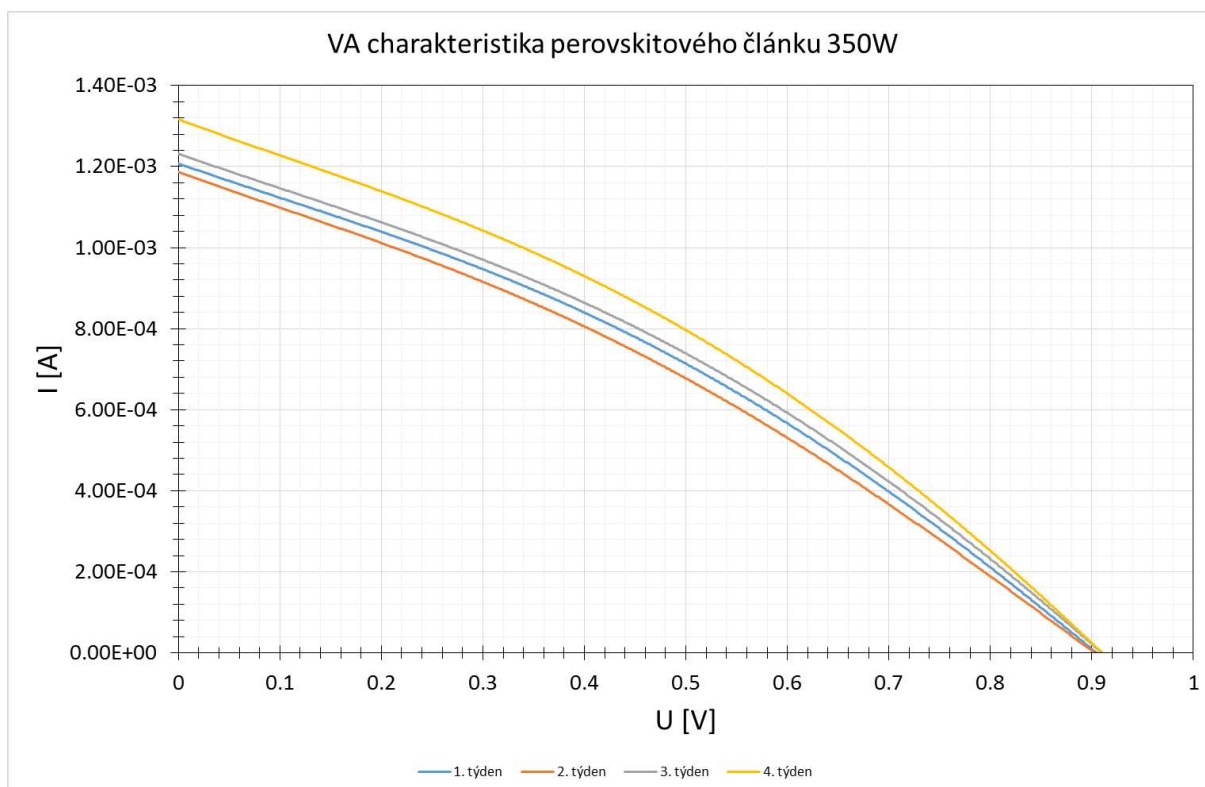
Graf 5 - Voltampérové charakteristiky 200 W – vzorek 5, elektroda 5



Graf 6 - Voltampérové charakteristiky 250 W – vzorek 5, elektroda 5



Graf 7 - Voltampérové charakteristiky 300 W – vzorek 5, elektroda 5

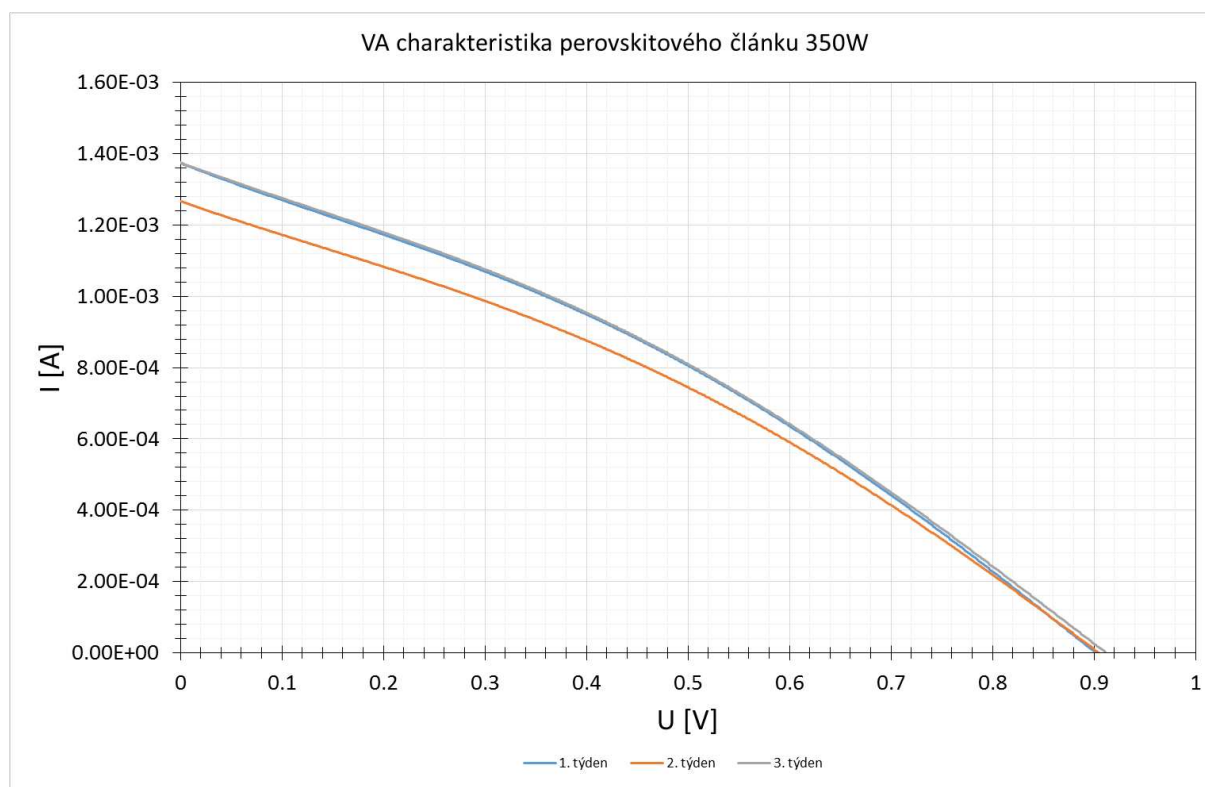


Graf 8 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 5, elektroda 5

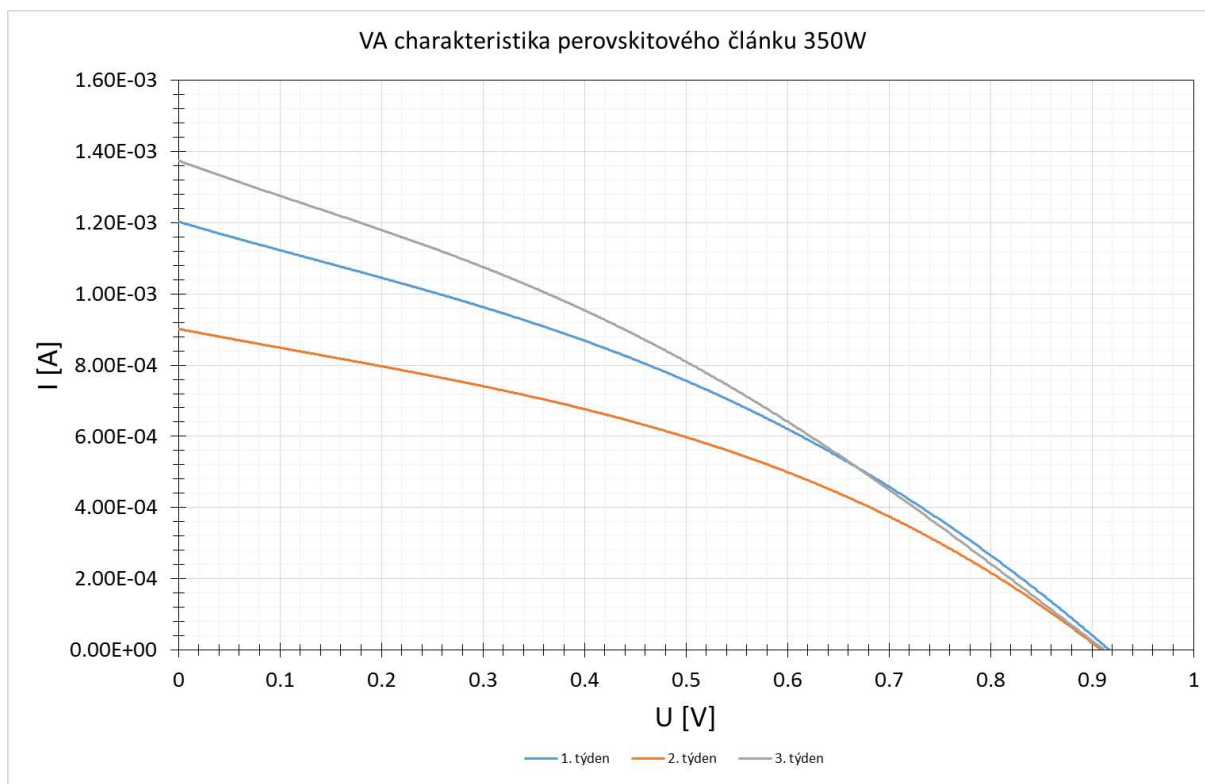
Z grafů výše lze vyčíst, že s rostoucí intenzitou osvětlení roste také proud naprázdno. Z tabulky je patrné, že s narůstajícím výkonem rostou ostatně všechny parametry, ale změny v napětích a fill facotru jsou vůči několikanásobnému nárůstu proudů malé.

Pro další porovnání jsou v následujících grafech porovnány různé vzorky při intenzitě osvětlení 350 W, při které byly rozdíly nejvíce patrné.

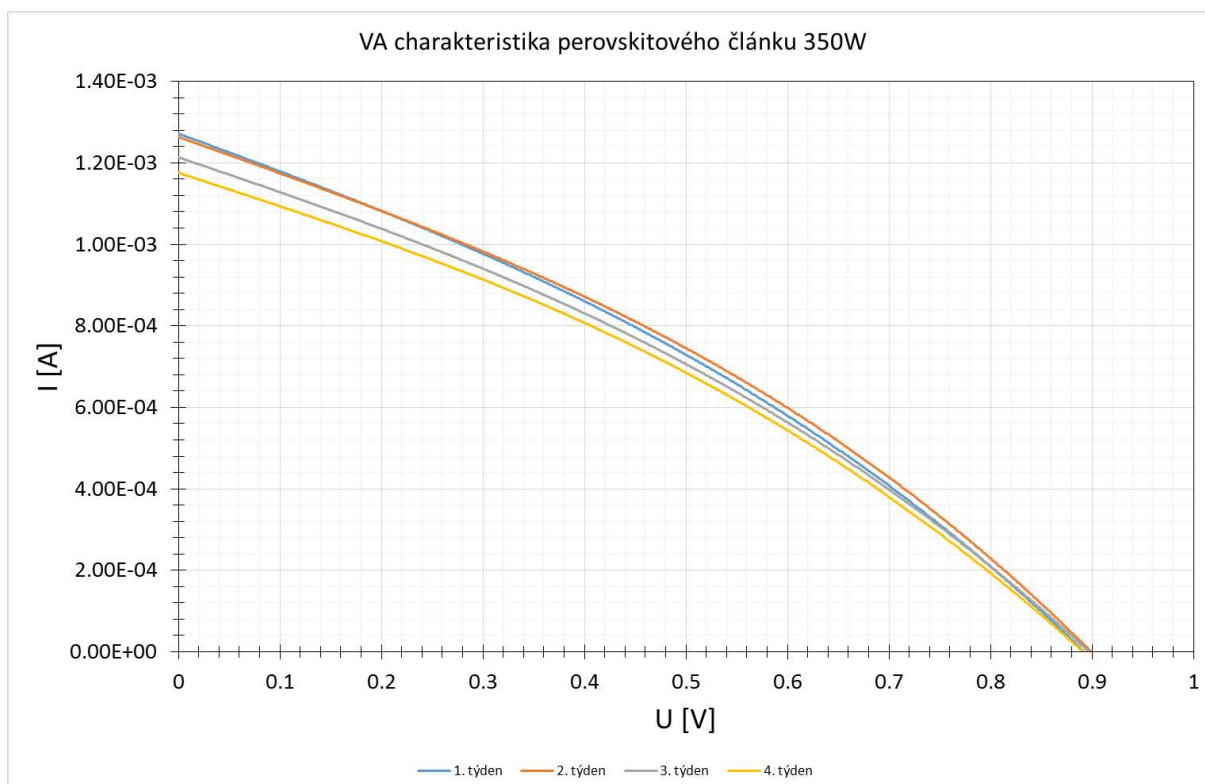
Z grafů je evidentní, že průběh není totožný. U vzorku 4 došlo při druhém měření k poklesu výkonu, ale při třetím došlo k nárůstu nad původní úroveň. To samé platí také pro vzorek 5, elektrodu 5, kdy je navíc ještě čtvrté měření, kde je nárůst výkonu ještě větší. Odlišný průběh ovšem vykazuje druhá elektroda u vzorku 5, kde dochází jen k poklesu. Důvod tohoto jevu by musel být podroben dalším experimentům.



Graf 9 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 4, elektroda 2

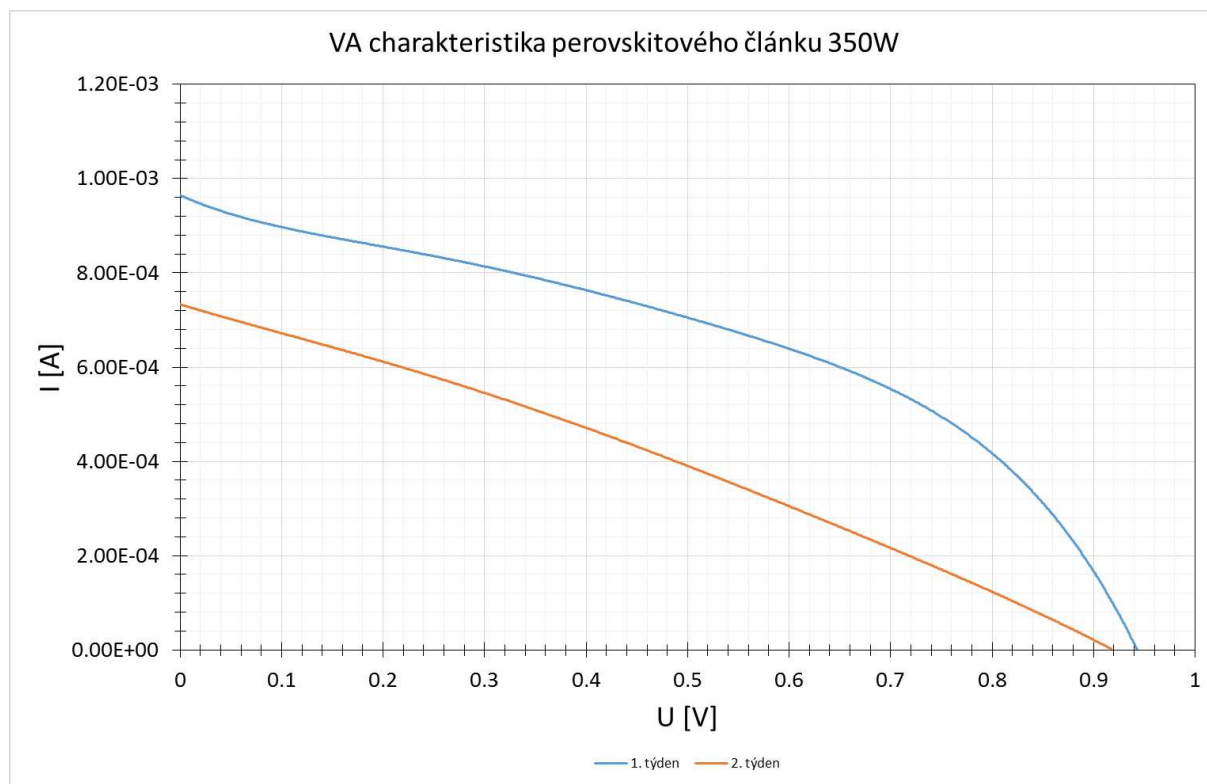


Graf 10 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 4, elektroda 3



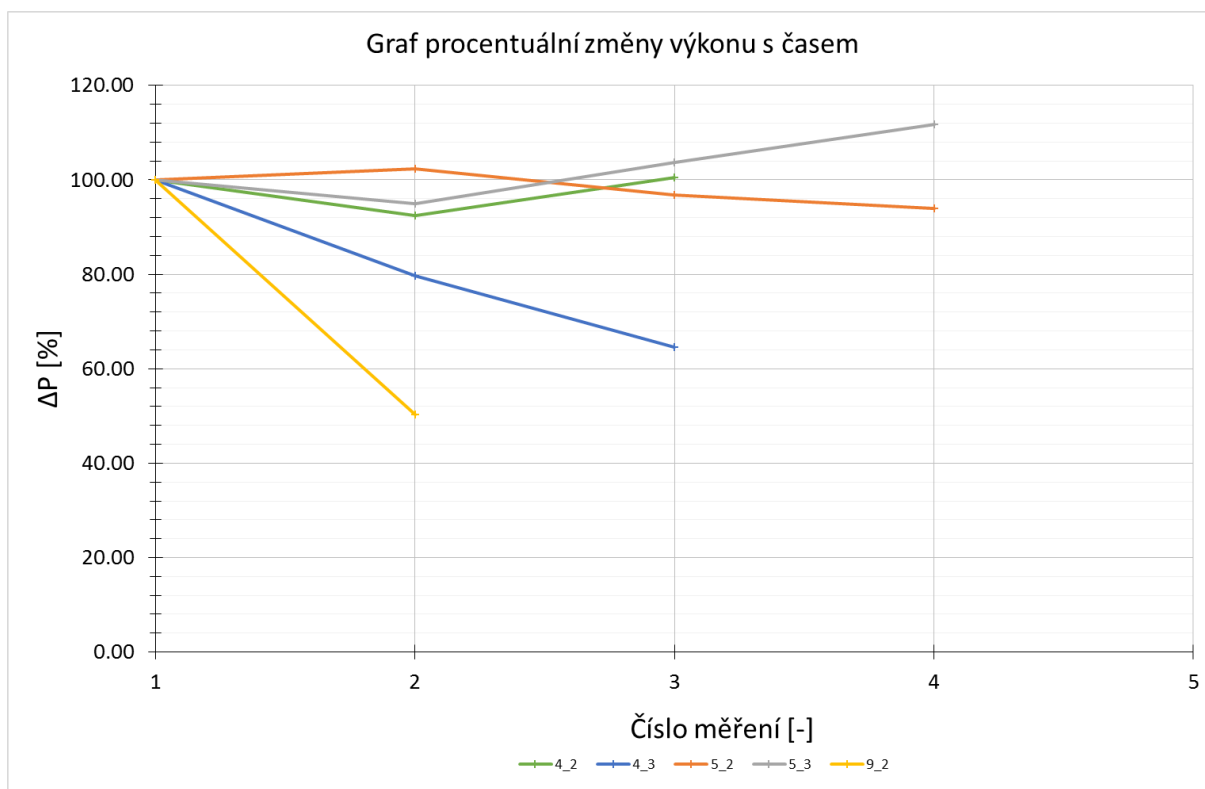
Graf 11 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 5, elektroda 2

Následující graf je vytvořen z hodnot získaných z další sady vzorků vyrobené v dubnu. Tento vzorek byl vyroben stejným postupem, ale byl použit perovskit namíchaný námi. Z tohoto grafu je patrné, že průběh je naprosto odlišný od předchozích měření.



Graf 12 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 9, elektroda 2

Jako poslední graf k voltampérové charakteristice je uveden graf procentuální změny výkonu v čase. V legendě grafu značí první číslo vzorek a druhé elektrodu.



Graf 13 - Procentuální změna výkonu jednotlivých vzorků

Z grafu je patrné, že vzorky se chovaly odlišně a to zejména vzorek 9 elektroda 2, který byl vyroben za pomoci námi namíchaného perovskitu. U tohoto vzorku došlo k poklesu o téměř 50 %. U ostatních vzorků byl trendem nejprve mírný pokles a poté nárůst nad hodnotu původního výkonu.

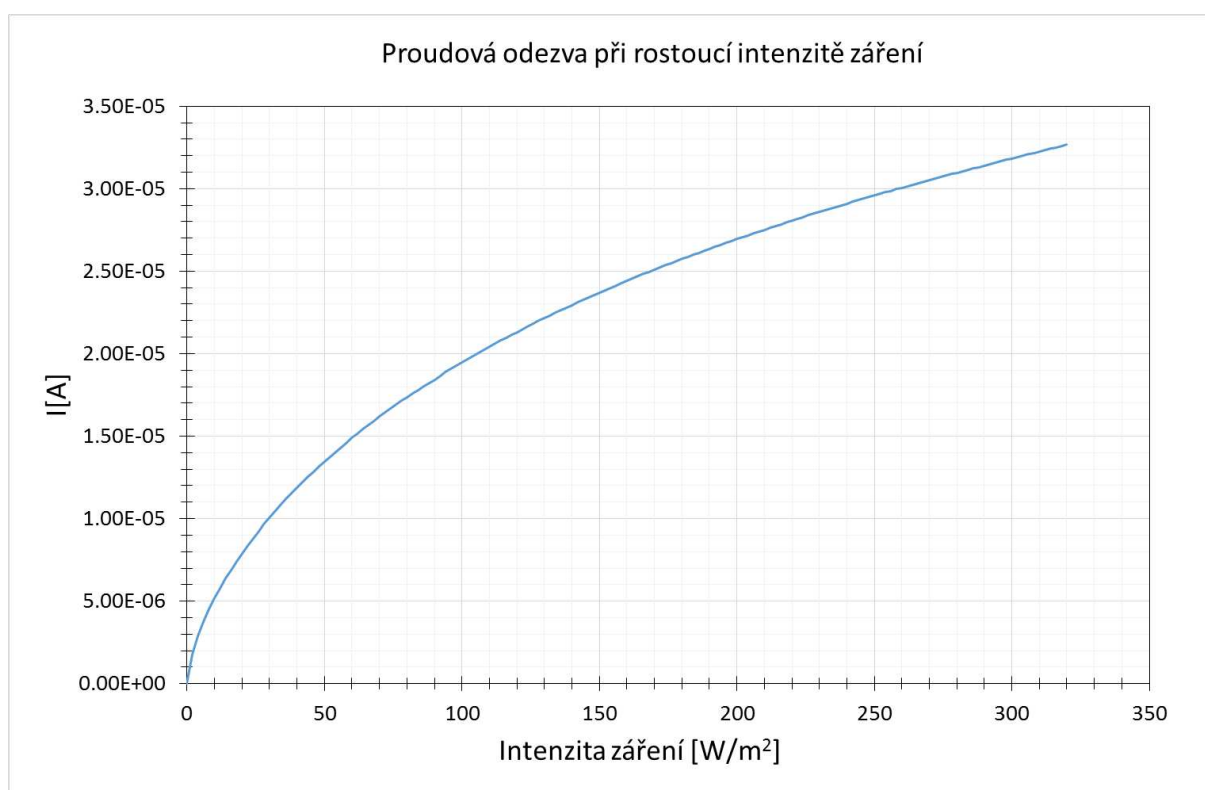
2. 2. 3. Statické měření – proudová odezva v závislosti na intenzitě záření

Pomocí této metody lze zjistit generaci proudu při postupném zvyšování intenzity osvětlení článku, tedy závislost generace proudu na intenzitě záření. Při měření je možné navolit si vlastní krok a rozsah v závislosti na použitém zdroji (horní omezení intenzity).

Při měření byl zvolen rozsah 0 až 350 W/m² po kroku 2 W/m². Další parametr, který se volí, je napětí, které je na článku. Toto napětí bylo nastavováno od 0 až po 0,8 V po kroku 0,2 V.

Výsledky starších vzorků

U těchto vzorků bylo provedeno pouze jedno měření a to od nuly do 320 W/m².

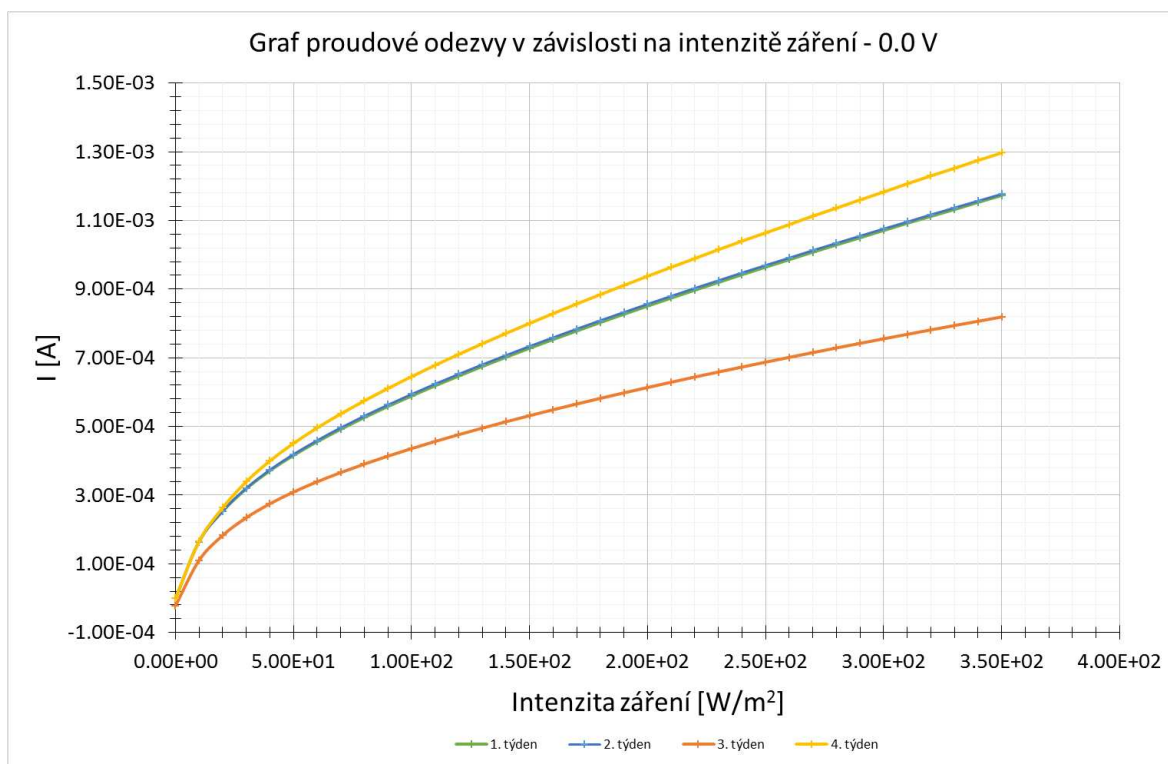


Graf 14 - Graf proudové odezvy při rostoucí intenzitě záření

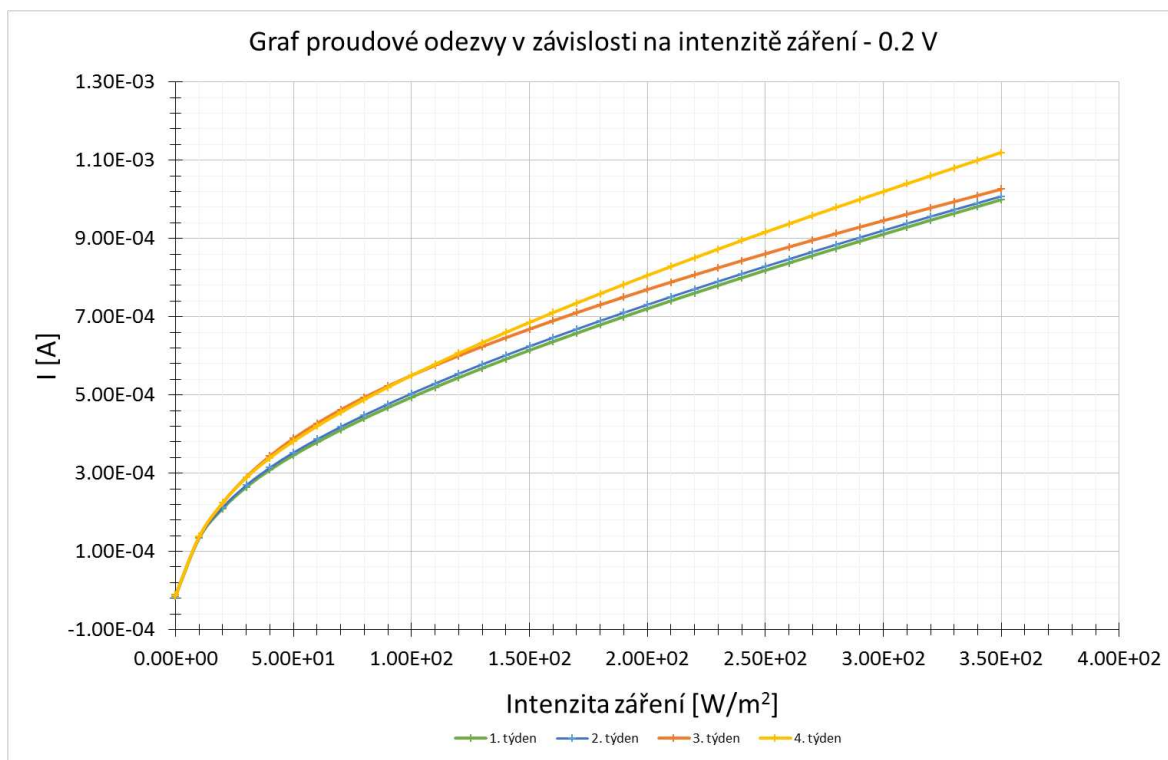
Dle grafu lze určit, že závislost proudové odezvy na intenzitě záření nebyla u tohoto článku lineární, ale spíše mocninná.

Výsledky nových vzorků

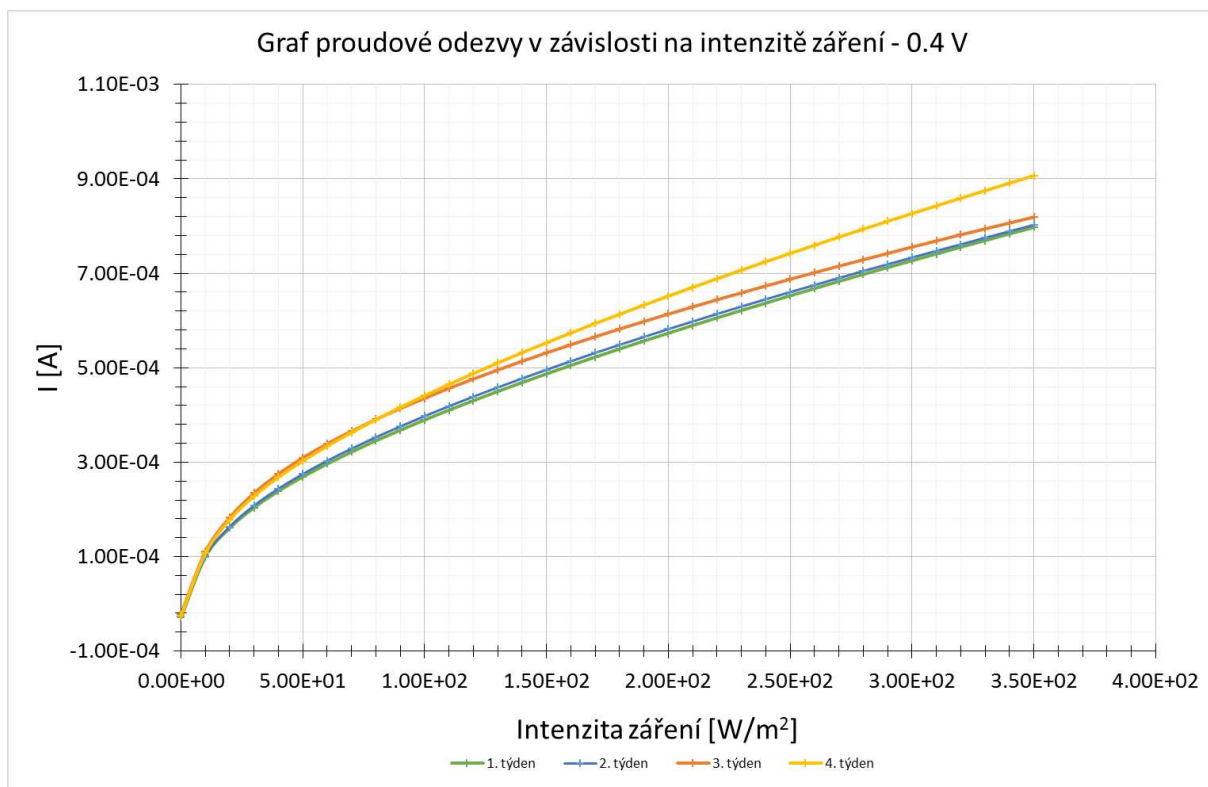
Jako první grafy jsou vyobrazeny rozdíly mezi průběhy při změně napětí na článku. Zvolený vzorek byl 5 a elektroda číslo 5.



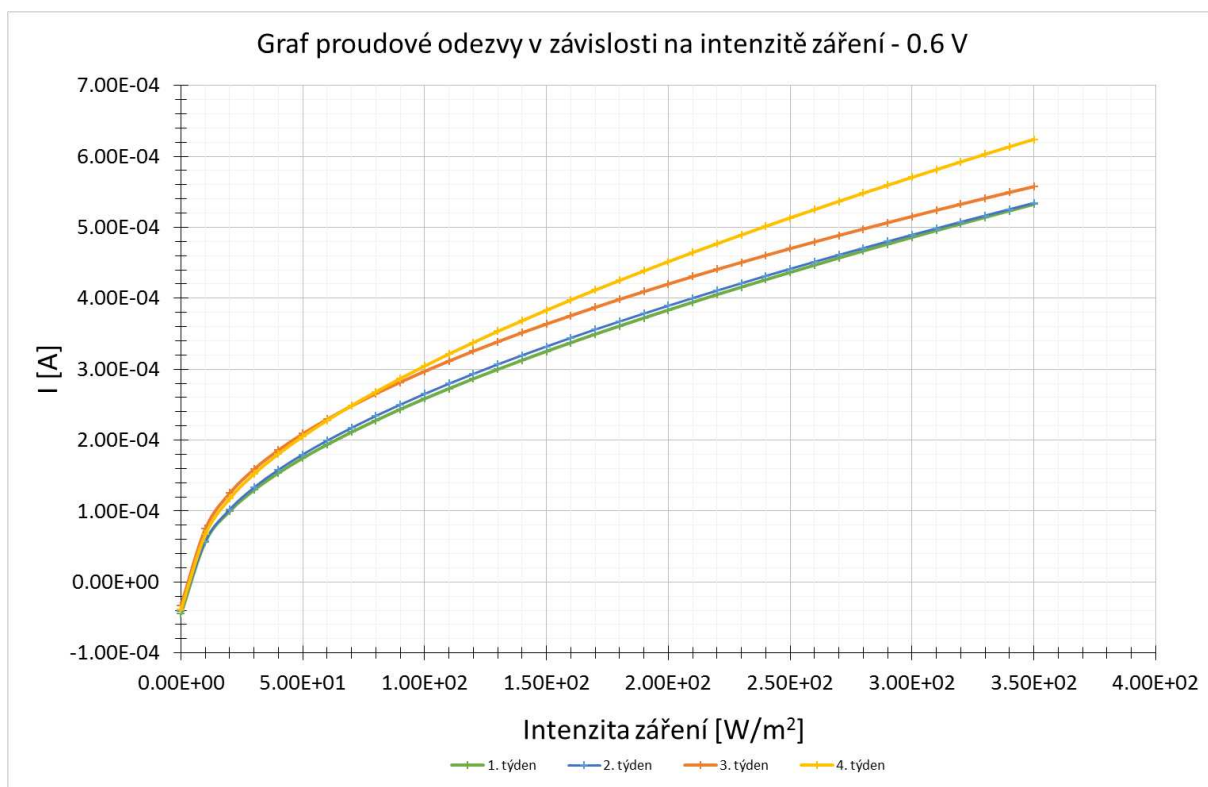
Graf 15 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0 V - vzorek 5, elektroda 5



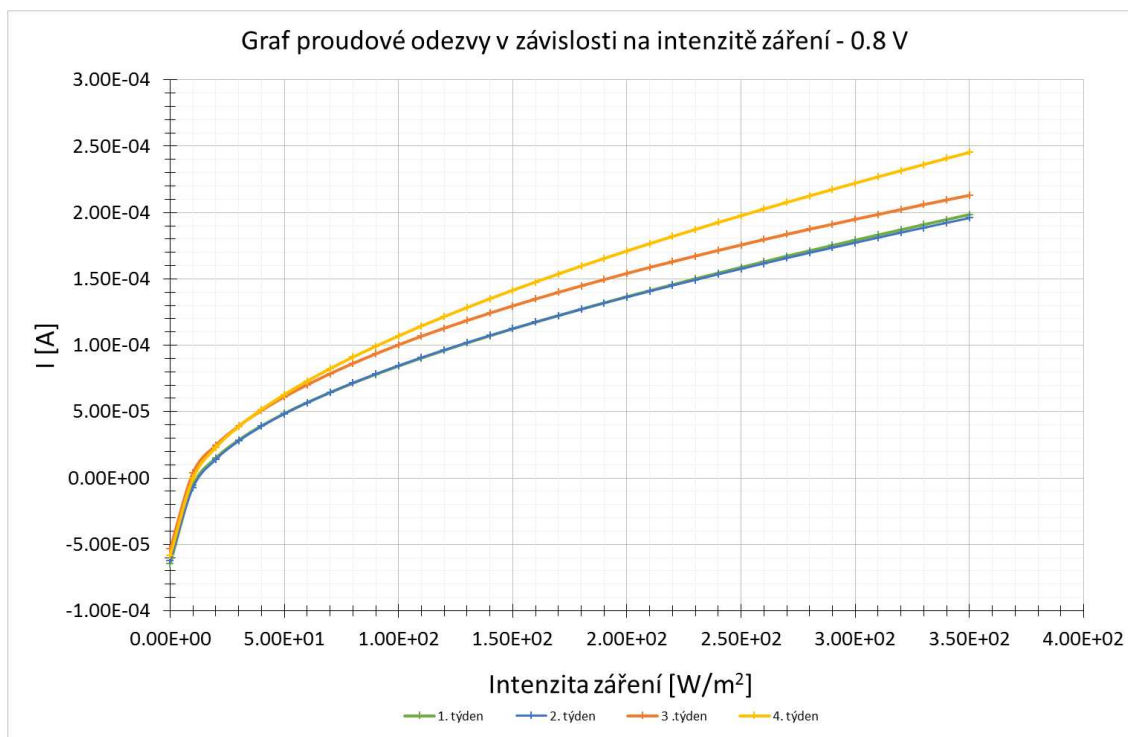
Graf 16 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,2 V - vzorek 5, elektroda 5



Graf 17 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 5, elektroda 5



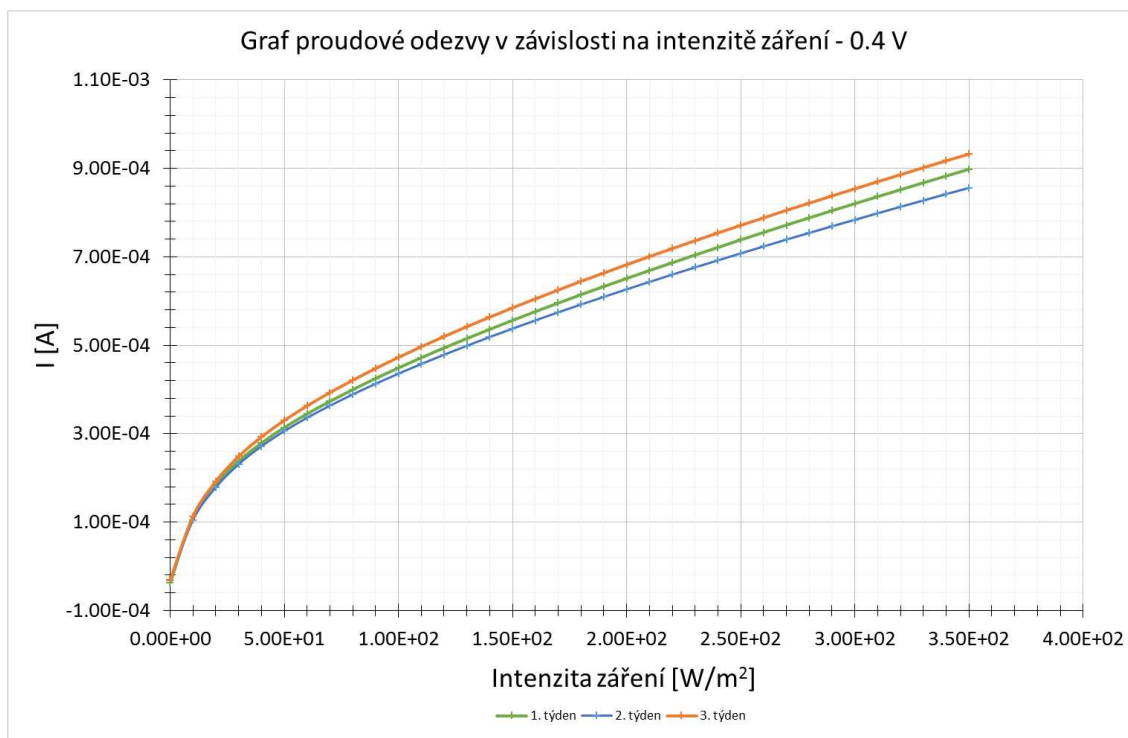
Graf 18 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,6 V - vzorek 5, elektroda 5



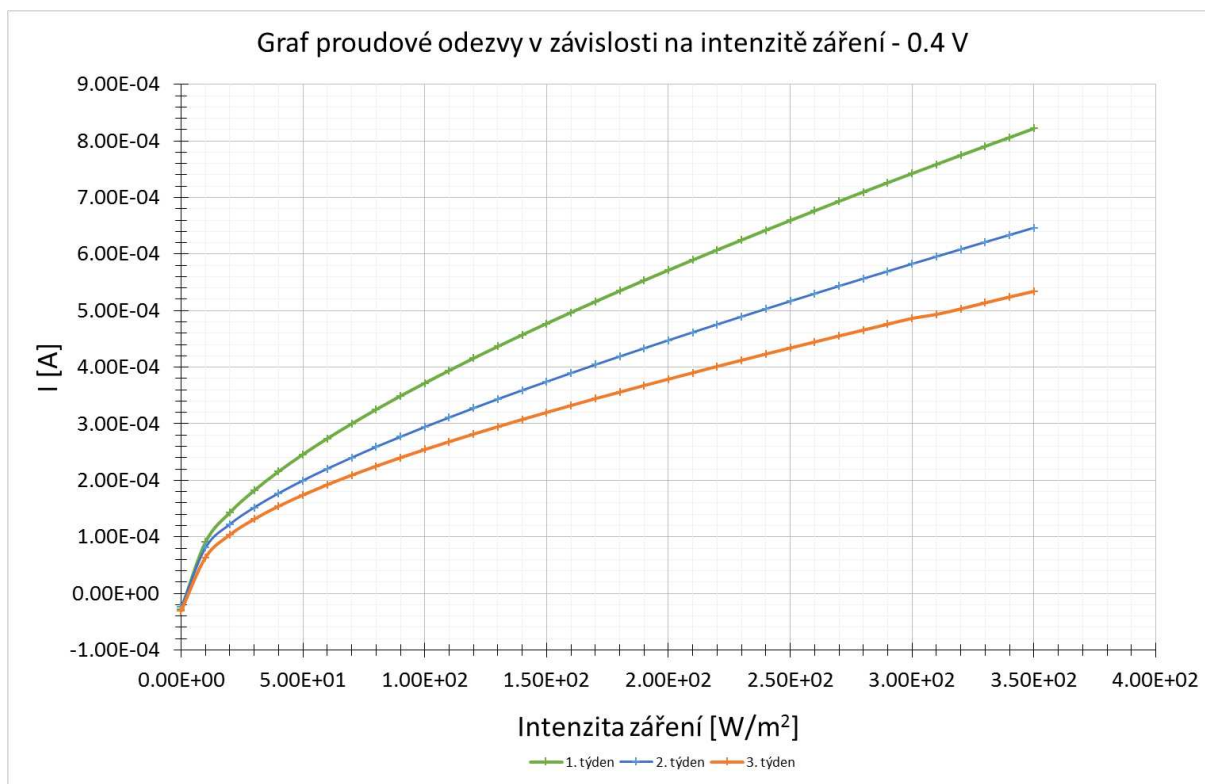
Graf 19 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,8 V - vzorek 5, elektroda 5

Z grafů je patrné, že při nulovém napětí na článku dochází ke generaci proudu ihned od minimální intenzity záření, ale při nastaveném napětí na článku je nutné vyšší intenzity zdroje, aby ke generaci došlo, předtím než k tomu dojde je proud odebírán. Je znatelné, že proud při z 1. a 2. týdne byl téměř totožný, ale při měření z 3. a 4. týdne došlo k jeho nárůstu.

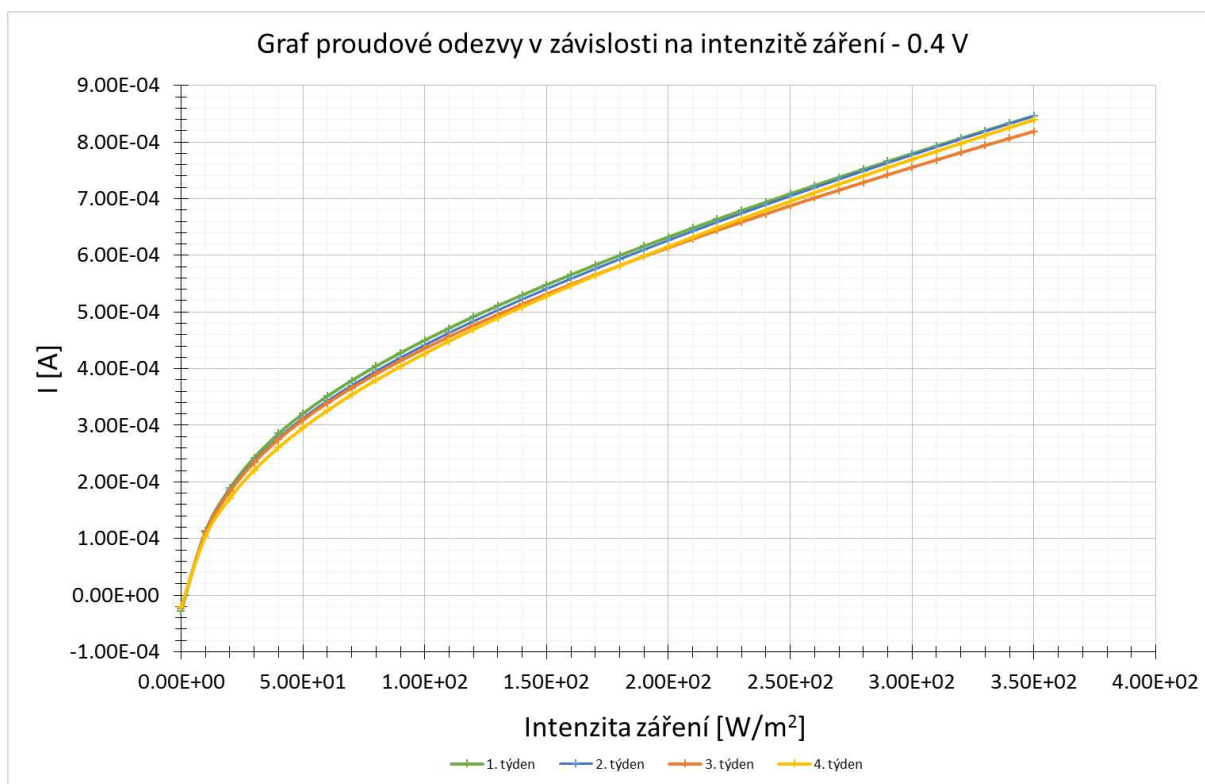
Dále jsou uvedeny příklady změn jiných vzorků při napětí na článku 0,4 V.



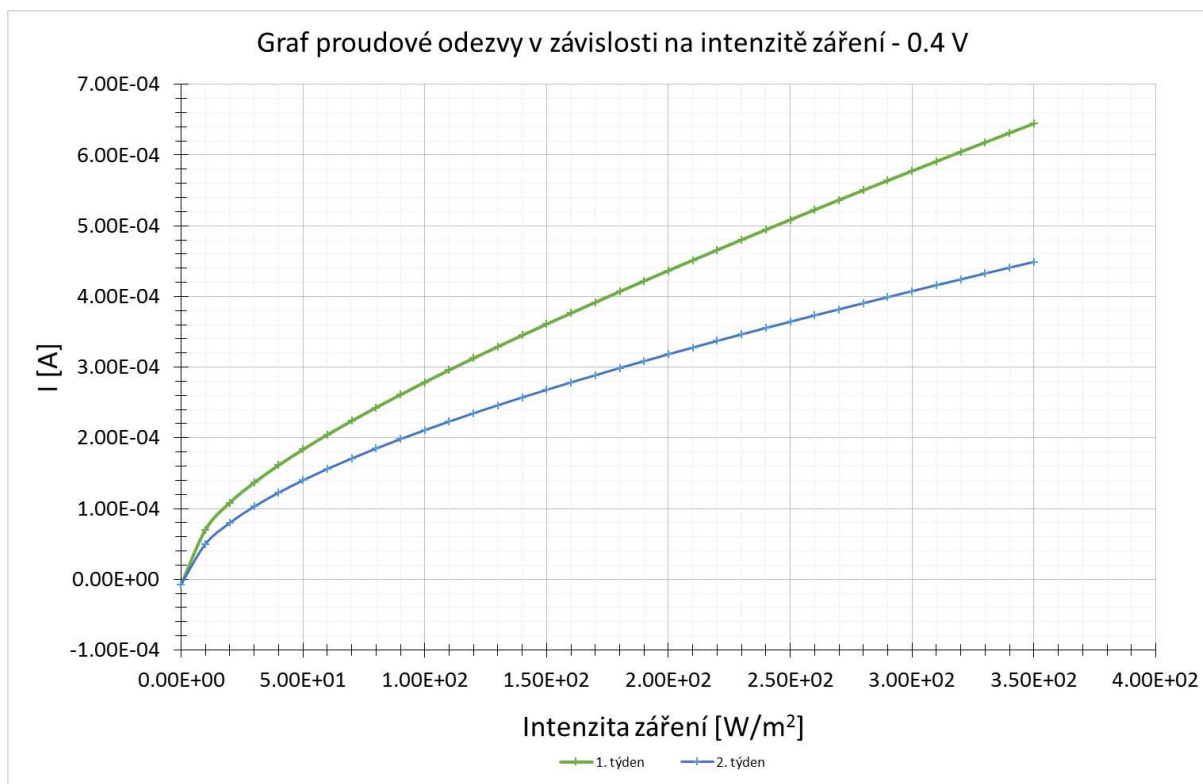
Graf 20 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 4, elektroda 2



Graf 21 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 4, elektroda 3



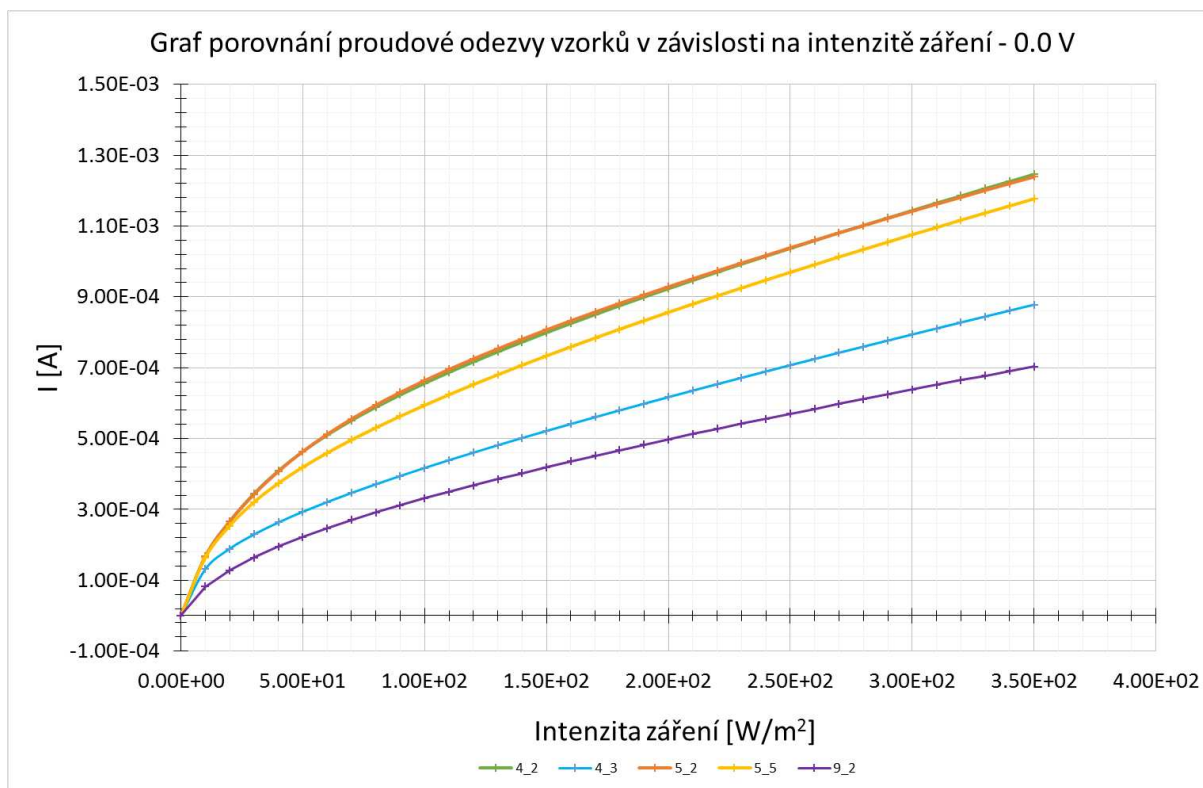
Graf 22 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 5, elektroda 2



Graf 23 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 9, elektroda 2

Změny u měřených vzorků jsou z grafů opět velmi dobře patrné. Mezitím co u elektrody 2 vzorku 4 dochází nejprve k poklesu proudu a poté k jeho nárůstu (rozmezí 0,1 mA), tak u elektrody 3 dochází s každým měřením k poklesu (rozmezí 0,3 mA). U vzorku 5, elektrody 2, dochází taky k poklesu, ale ten je velmi mírný. Naopak je tomu u vzorku 9 elektrody 2, kde již po jednom týdnu dochází k poklesu o 0,2 mA.

Následuje graf, který porovnává generaci proudu jednotlivých článků při nulovém napětí na článku. Data pocházejí z druhého měření. Pokud se na tento graf podíváme, můžeme vyhodnotit, že vzorky 4 a 5 dosahovaly vyšších proudů, i když elektroda 3 vzorku 4 byla hodnotami také poměrně nízko. Nejnižších proudů však dosahoval vzorek 9.



Graf 24 - Porovnání proudové odezvy vzorků v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0 V

2. 2. 4. Dynamické měření – fáze a proudová odezva v závislosti na frekvenci

Metoda CIMPS a CIMVS

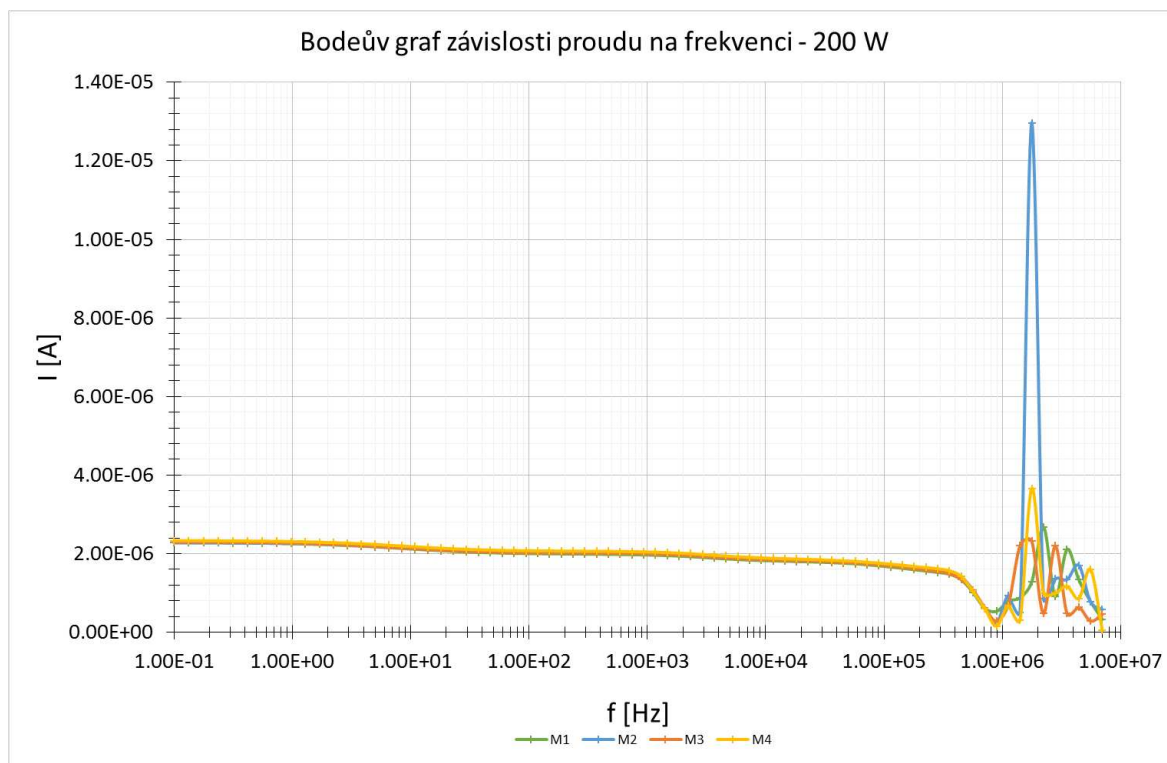
Při měření bylo využito metody IMPS (Intensity modulated photocurrent spectroscopy) i IMVS (Intensity modulated photovoltage spectroscopy). Rozdíl mezi těmito metodami je, že při metodě IMPS je měřena přechodná funkce mezi modulovanou intenzitou záření a generovaným střídavým proudem, mezitím co při metodě IMVS dochází k měření přechodové funkce mezi modulovanou intenzitou záření a generovaným střídavým napětím.

Dynamické měření měří závislost proudové odezvy a fáze na frekvenci. Během měření dochází k měření daného rozsahu frekvencí (od 7mHz do 0,1 Hz).

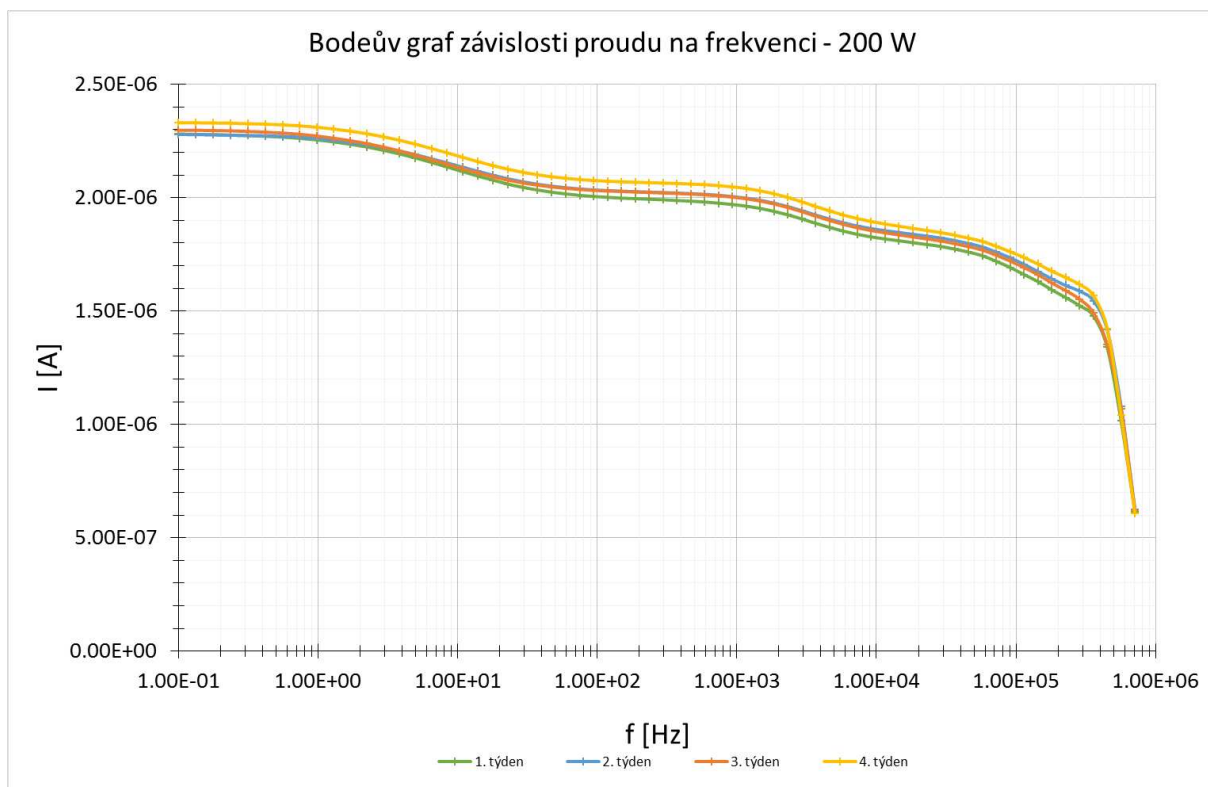
Program byl dále nastaven na průměrnou intenzitu 200 a 350 W/m², v dialogovém okně Source Control na frekvenci 1 kHz, amplitudu 200 mV.

Naměřená data vynesena do dvou typů grafů. První typ je graf Nyquistův, kde vynášíme závislost imaginární složky na reálné. Druhý graf se nazývá Bodeův a zde se nanáší absolutní hodnota (například impedance) v závislosti na frekvenci, jejíž osa je v logaritmickém měřítku.

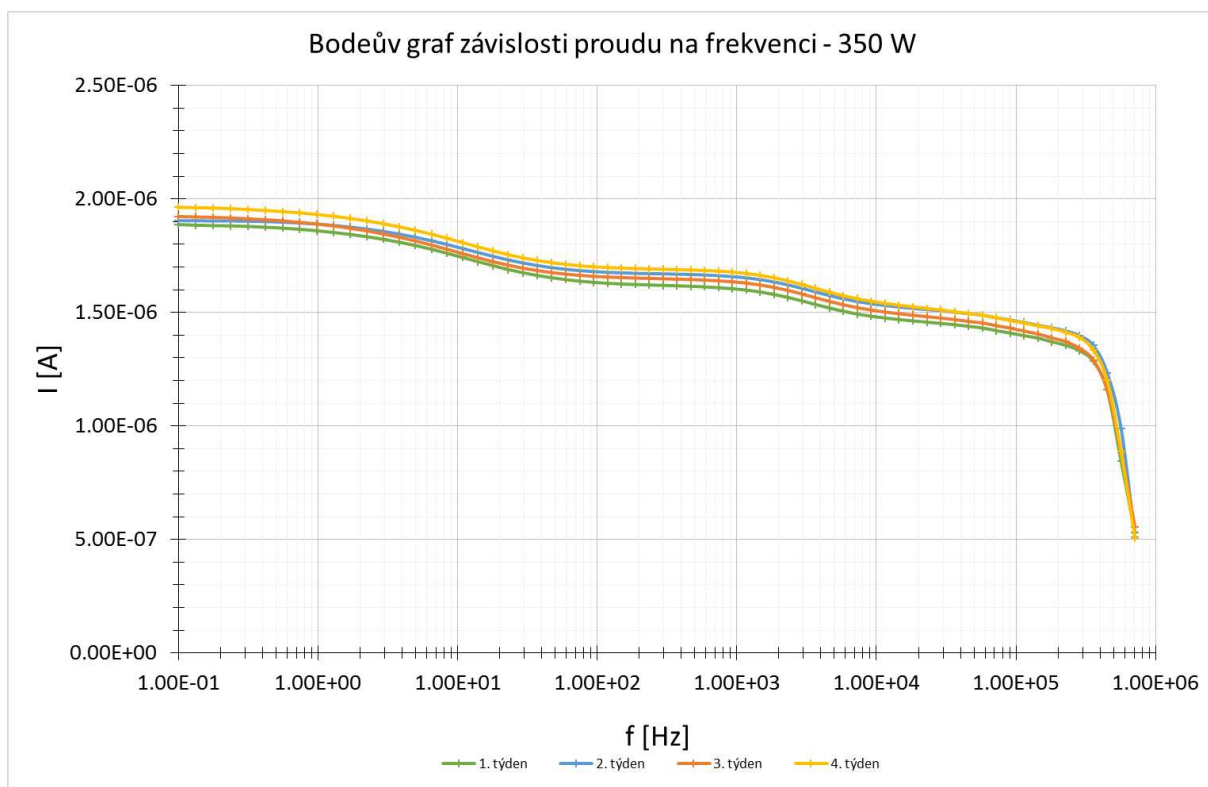
V následujících grafech jsou vyneseny výsledky měření vzorku číslo 5, elektrody 2. První graf je ukázkový a ukazuje, jaký byl průběh až do 7 MHz, další jsou ořezány po frekvenci, kdy nebyly vykazovány výkyvy.



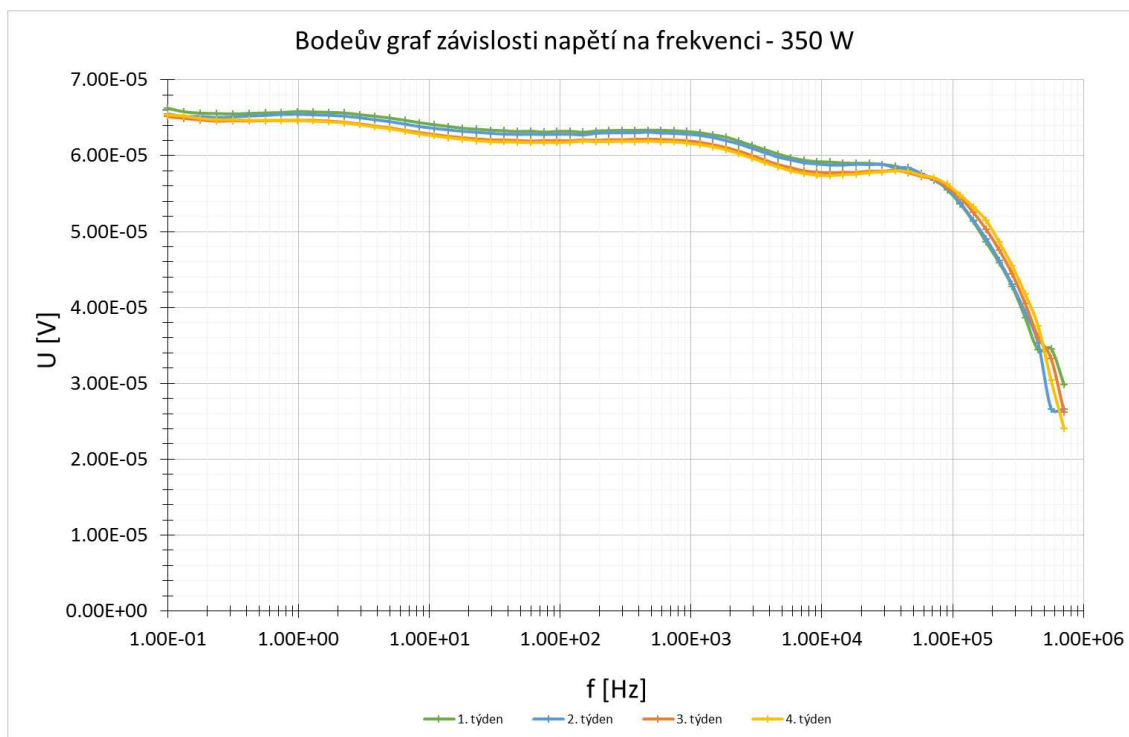
Graf 25 - Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 200 W, neořezaný – vzorek 5, elektroda 2



Obrázek 26 - Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 200 W – vzorek 5, elektroda 2



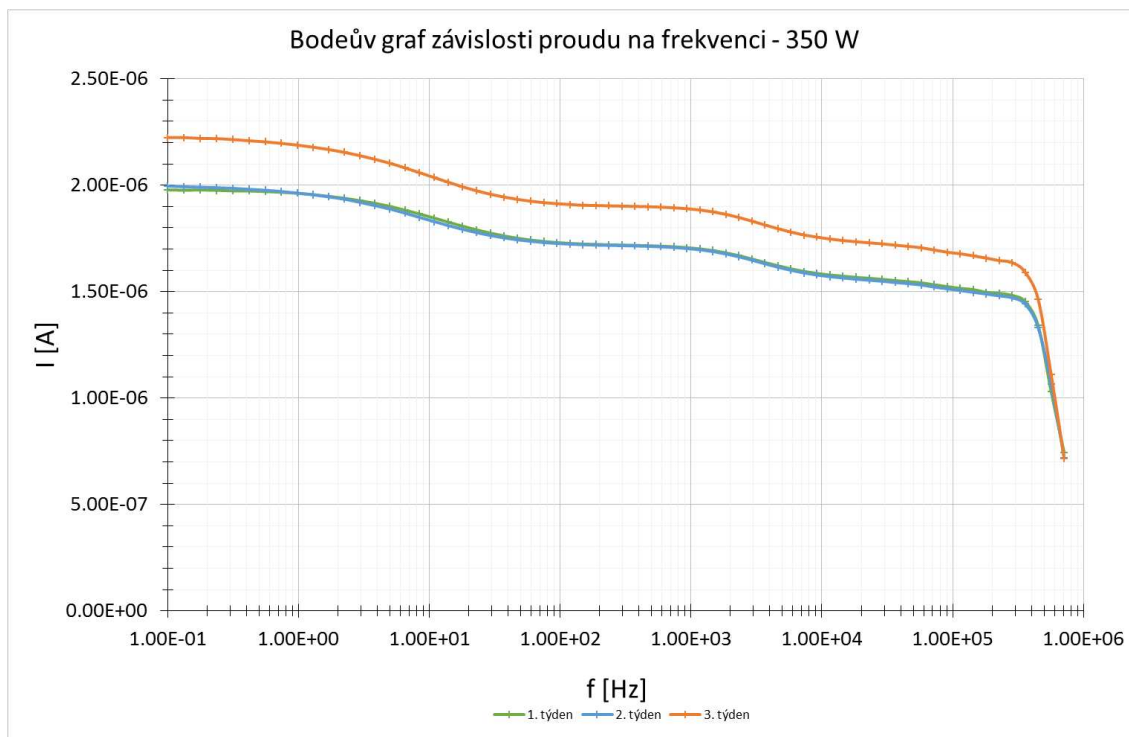
Graf 26 - Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 350 W – vzorek 5, elektroda 2



Graf 27 – Bodeův graf závislosti napěťové odezvy na frekvenci při 350 W – vzorek 5, elektroda 2

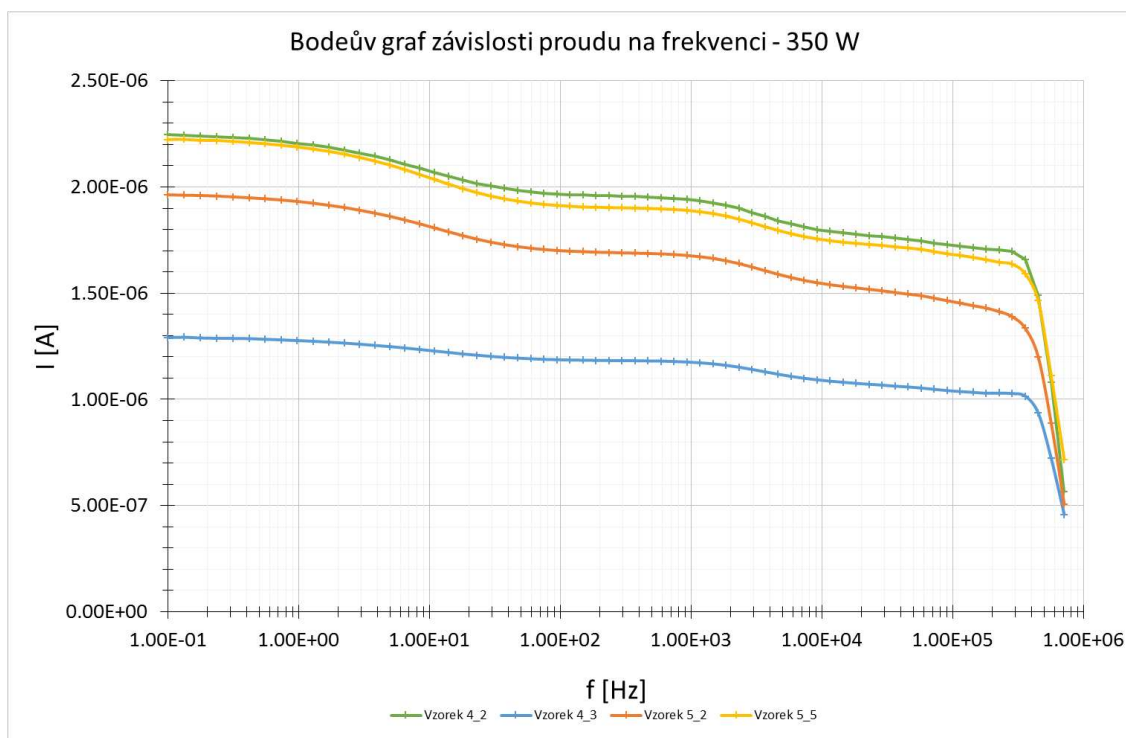
Z předešlých grafů lze vyčíst, že všechny hodnoty v předešlých grafech spolu s rostoucí frekvencí klesají.

V grafu níže jsou pro porovnání uvedeny změny výsledků měření u vzorku 5, elektrody 5. Výsledky tohoto měření jsou téměř totožné s měřením předchozím. Lze vidět, že na rozdíl od předchozího měření došlo s časem k navýšení hodnot proudové odezvy.



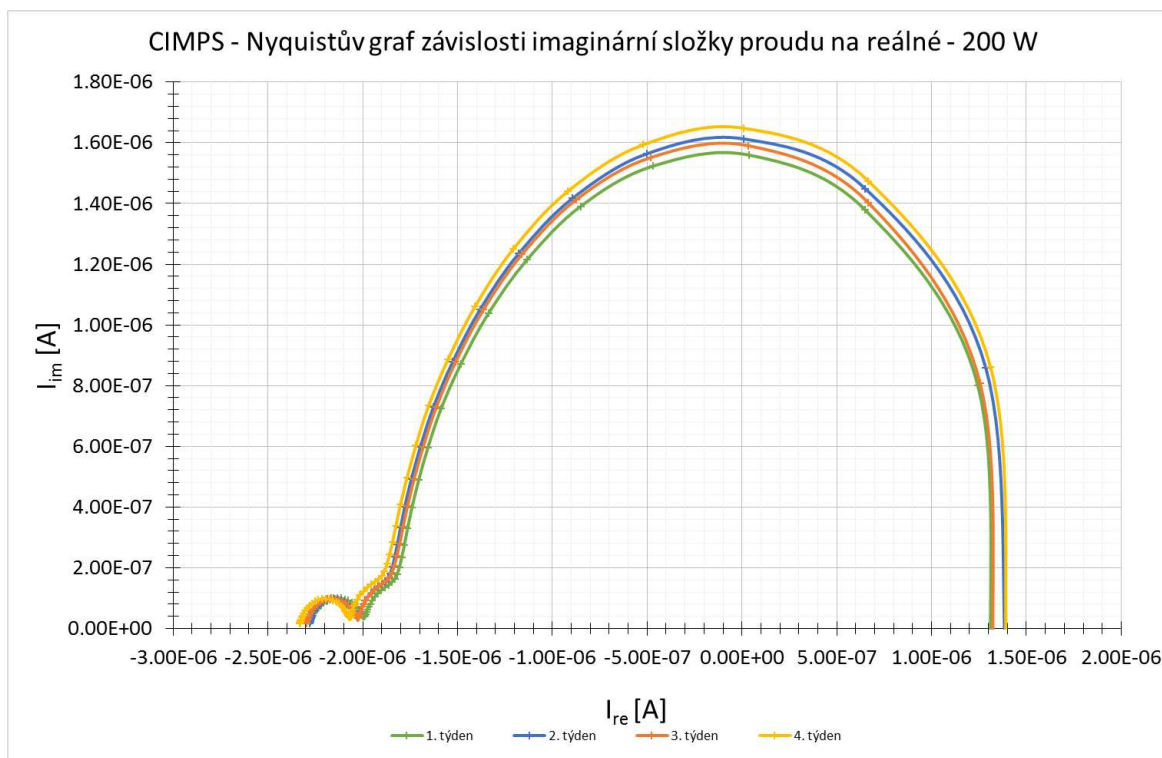
Graf 28 – Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 350 W – vzorek 5, elektroda 5

Posledním Bodeovým grafem je graf porovnávající výsledky měření dosažené u různých vzorků při intenzitě 350 W. V legendě znamená první číslo označení vzorku a druhé označuje elektrodu. Z tohoto grafu je patrné, že u všech vzorků dochází se zvyšující frekvencí ke klesání odezvy proudu.

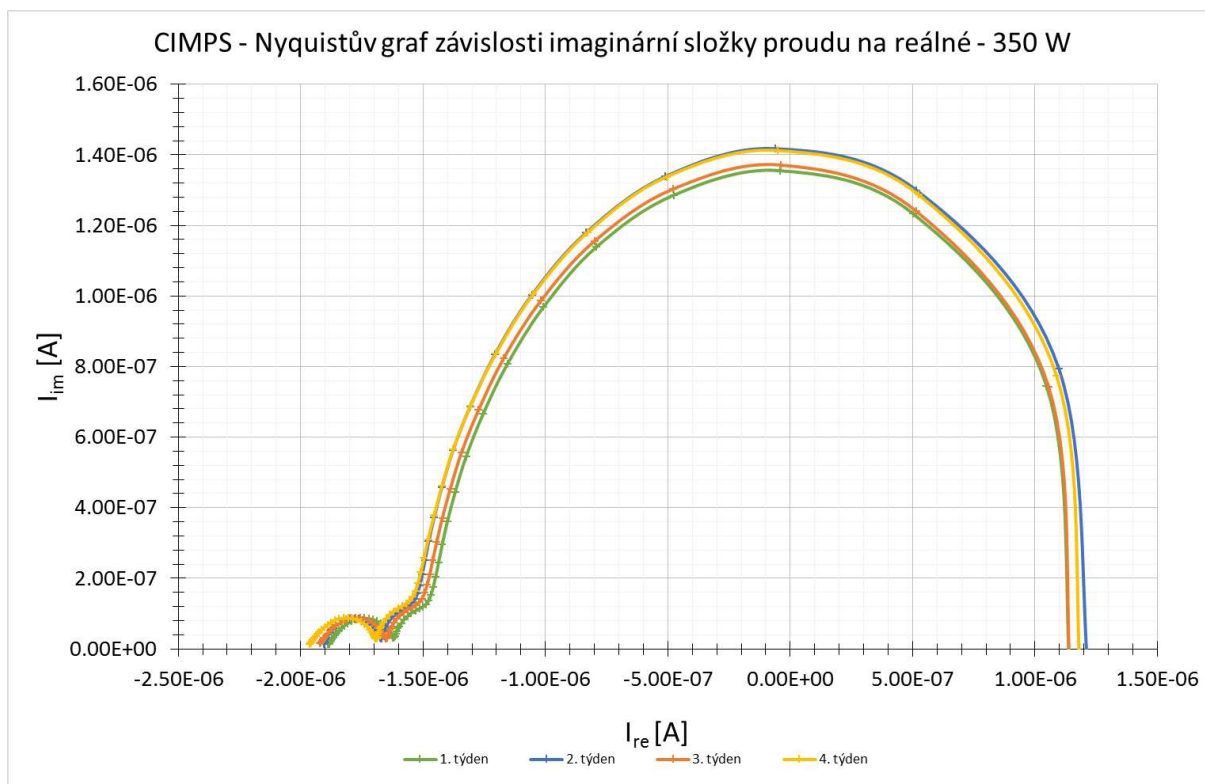


Graf 29 - Porovnání výsledků měření CIMPS 350 W, dosažených u různých vzorků

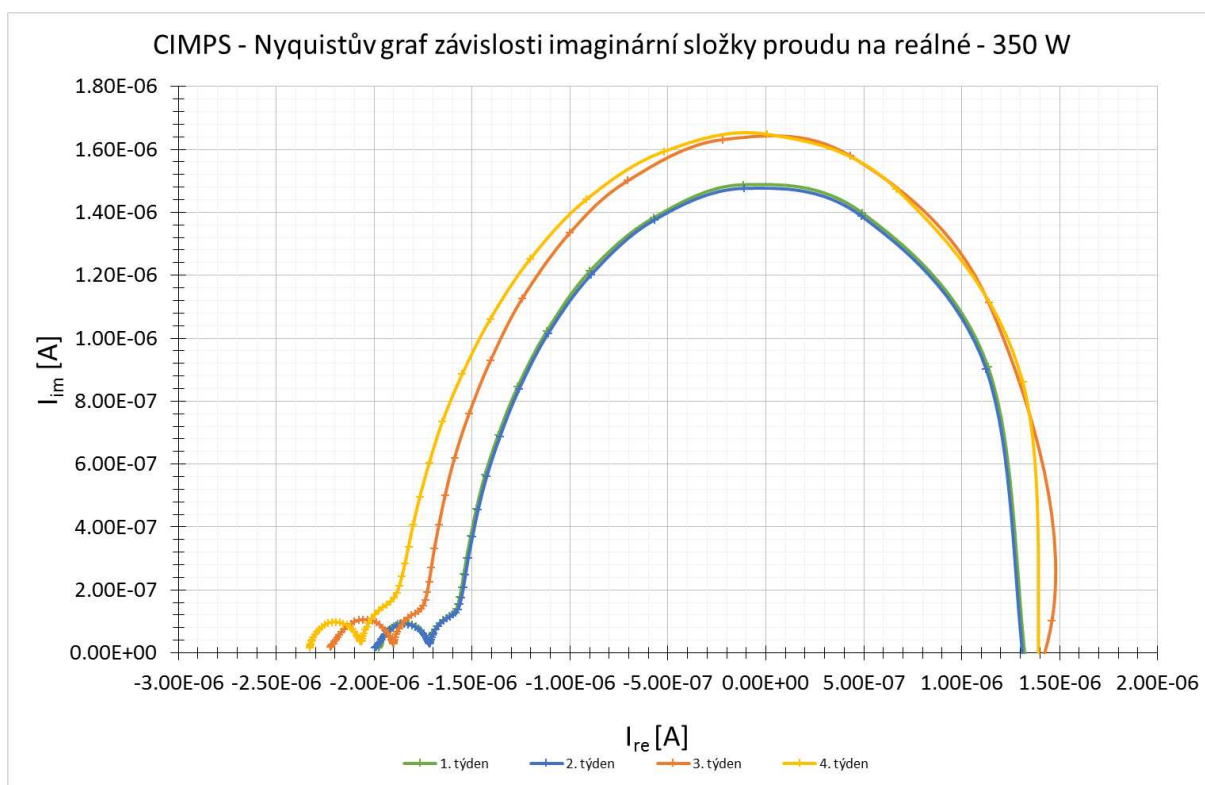
Následující grafy nyquistova typu. Hodnoty pochází ze stejného vzorku a elektrody.



Obrázek 27 – CIMPS - Nyquistův graf závislosti imaginární složky proudu na reálné při 200 W – vzorek 5, elektroda 2



Obrázek 28 - CIMPS - Nyquistův graf závislosti imaginární složky proudu na reálné při 350 W – vzorek 5, elektroda 2



Obrázek 29 - CIMPS - Nyquistův graf závislosti imaginární složky proudu na reálné při 350 W – vzorek 5, elektroda 5

Z předešlých grafů lze určit střední doba života nosičů náboje τ_{CT} . Pro tento účel slouží vzorec [14]:

$$\tau_{CT} = \frac{1}{2 * \pi * f_{min}}$$

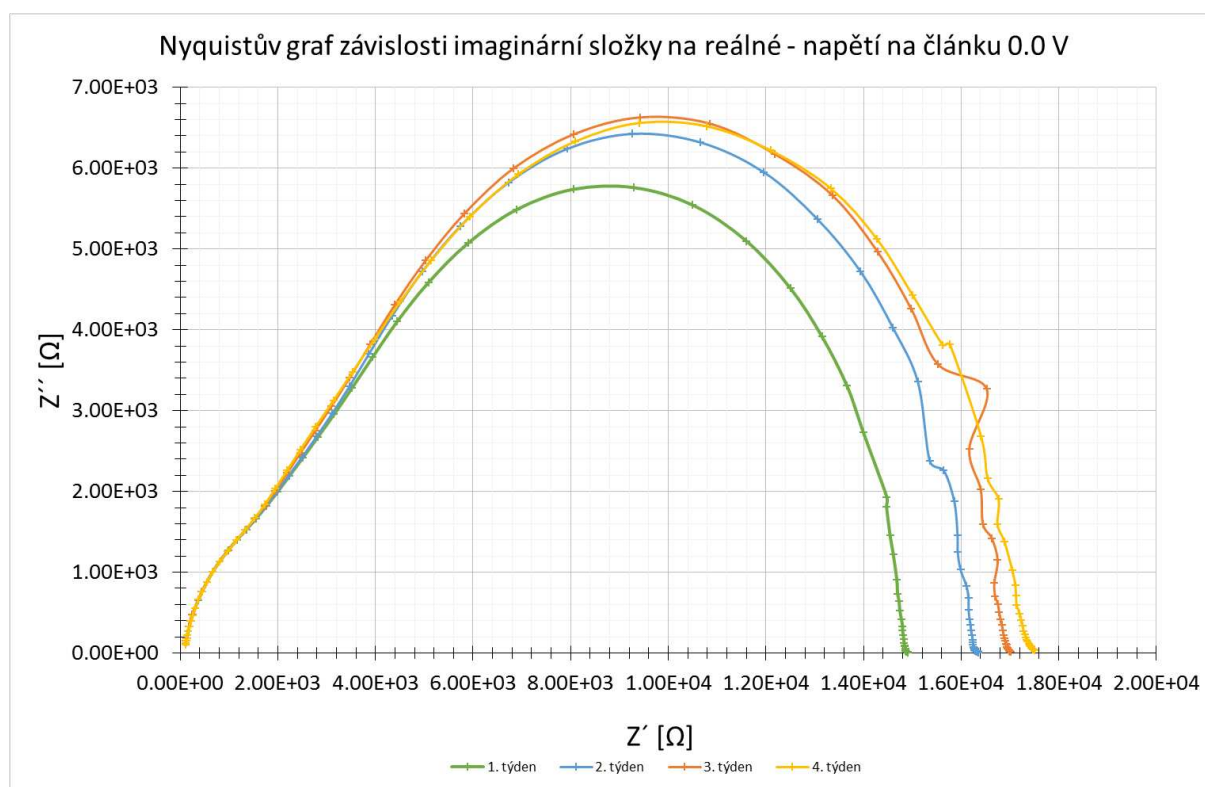
Kde f_{min} je hodnota frekvence v místě vrcholu oblouku křivky. [15] Po nalezení těchto bodů byla určena tato frekvence a vypočtena doba života nosičů náboje, která u vzorku 5, elektrody 2 a intenzitu zdroje 200 W byla nejprve u měření v prvních dvou týdnech 18,9 ms, v dalších dvou měřeních došlo k navýšení doby života nosičů na 24,5 ms. Při zvýšené intenzitě osvětlení byl průběh stejný, ale čas se navýšil z 14,6 ms na 18,9 ms. Při měření u vzorku pět došlo k navýšení času již při druhém měření a to z 14,6 ms na 18,9 ms.

Metoda EIS

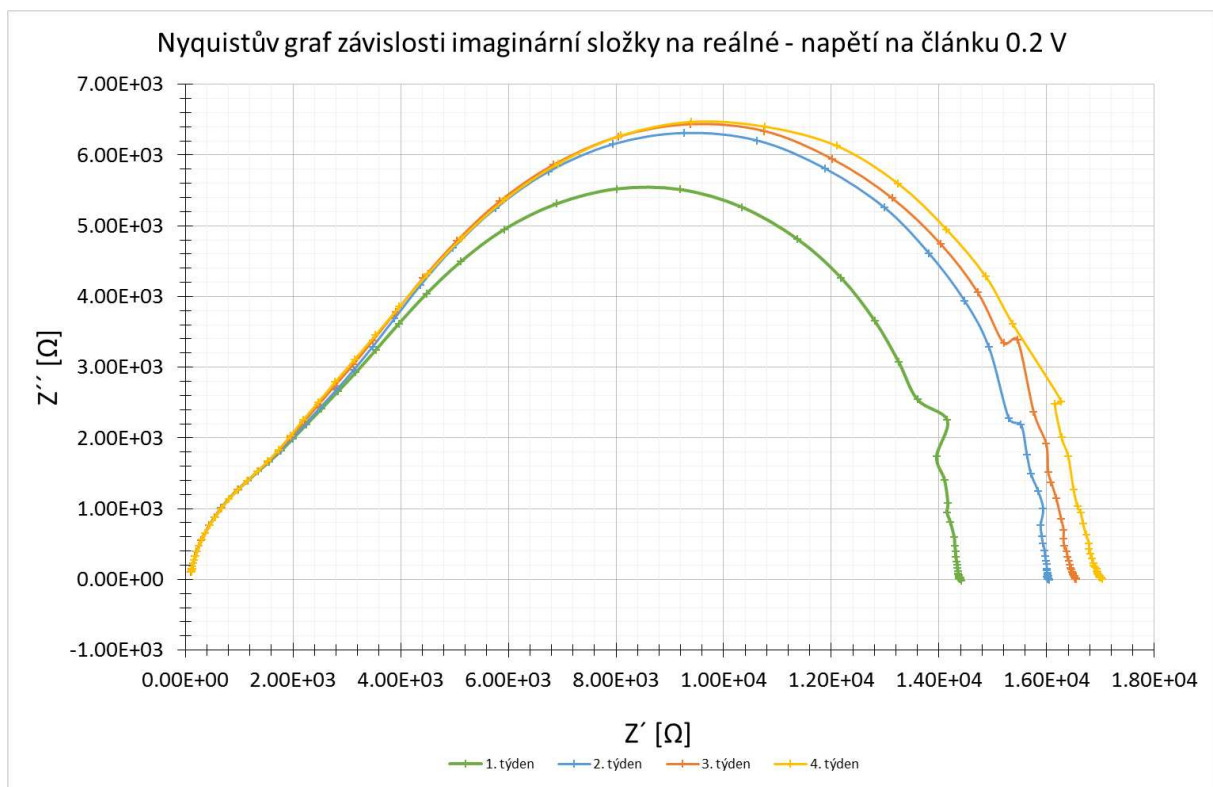
Metoda elektrochemické impedanční spektroskopie spočívá ve vkládání konstantního potenciálu se superponovaným střídavým napětím na elektrodu a měření střídavé složky proudové odezvy. Na elektrodu je tedy vkládáno napětí a je měřena proudová odezva, tím je měřena impedance systému.

Frekvenční rozsah byl v řešeném případě zvolen od 1 MHz do 0,1 Hz a amplituda střídavého napětí byla nastavena na 10 mV.

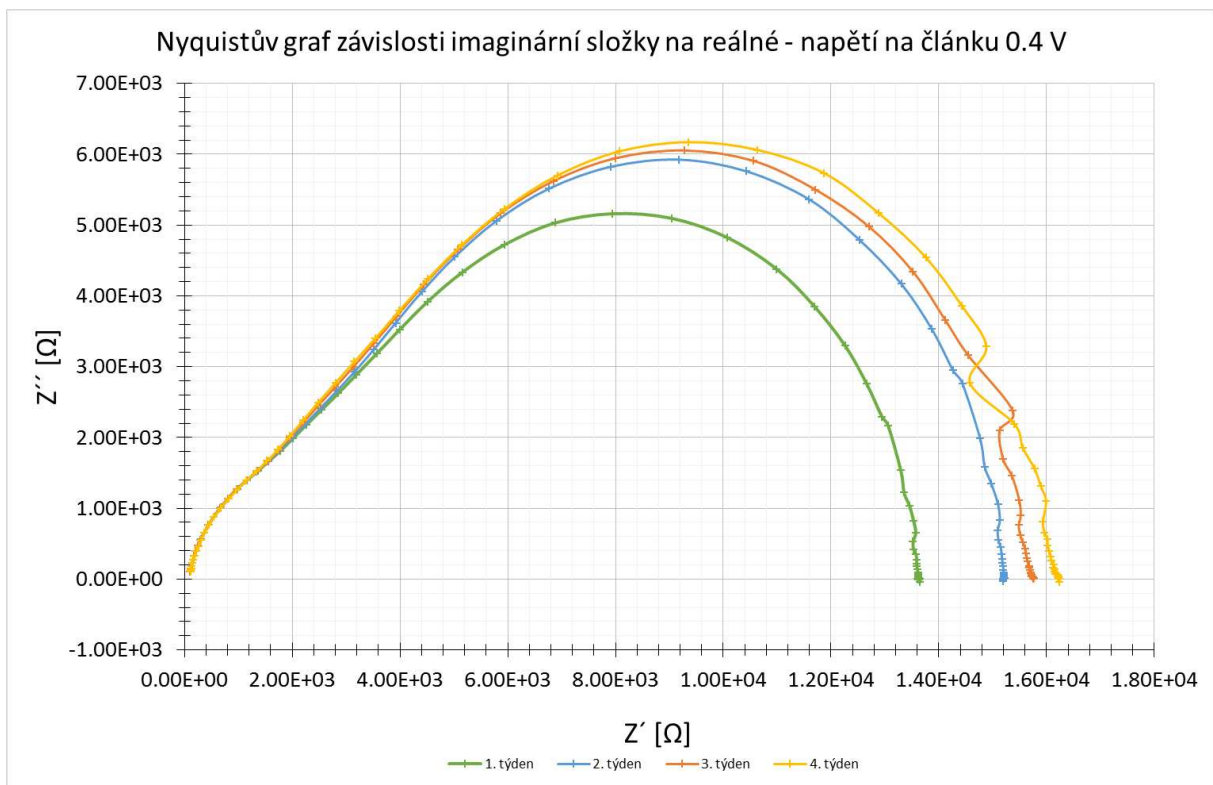
Vzorek zvolený pro interpretaci dat byl vzorek 5 a elektroda 5.



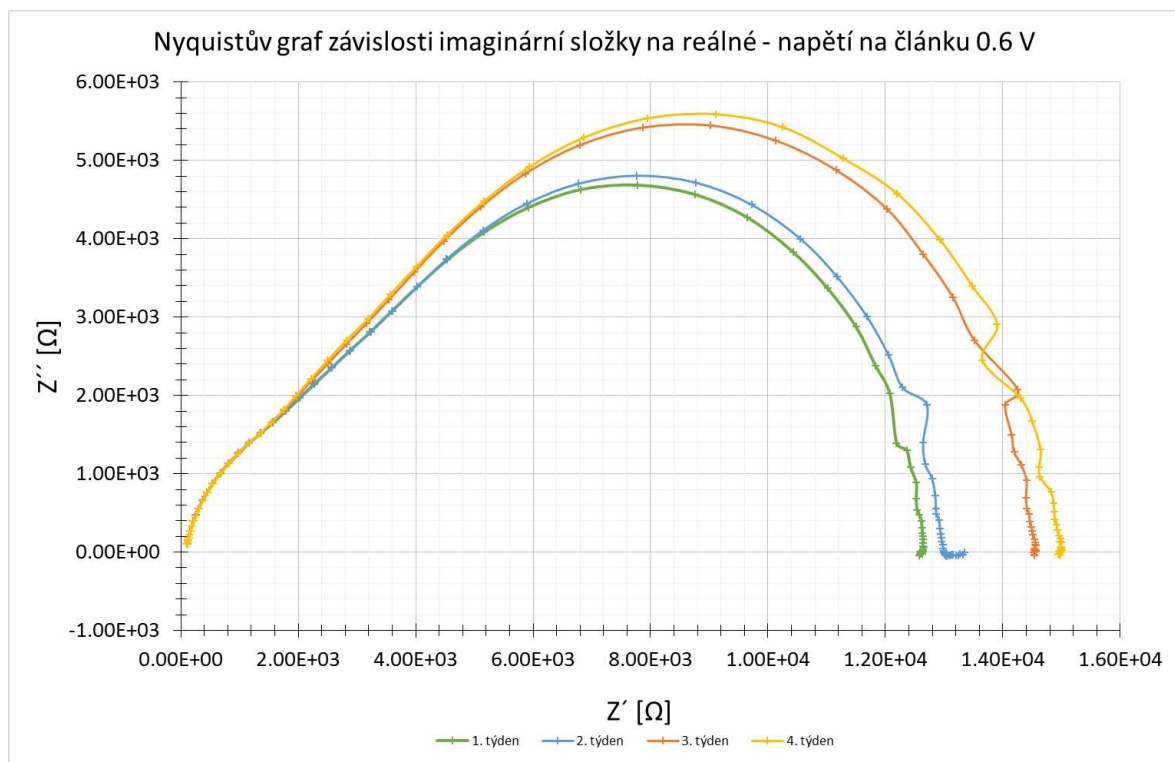
Graf 30 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,0 V, vzorek 5 elektroda 5



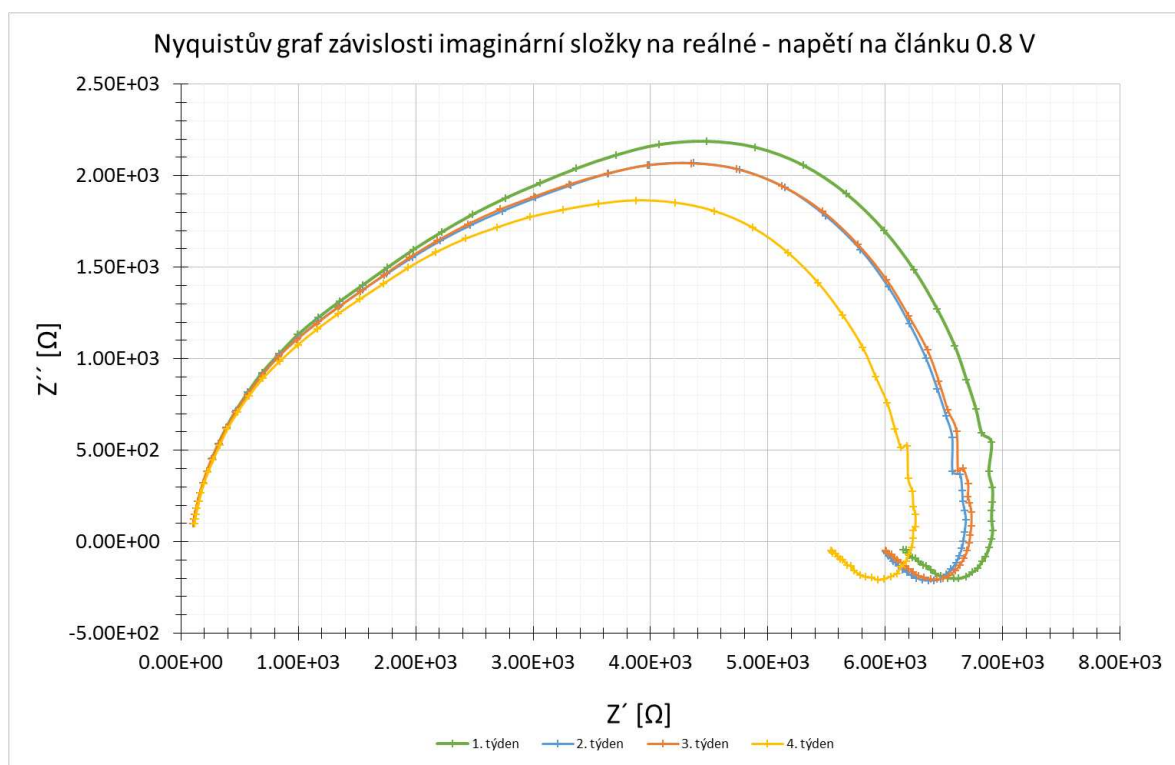
Graf 31 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,2 V, vzorek 5 elektroda 5



Graf 32 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,4 V, vzorek 5 elektroda 5

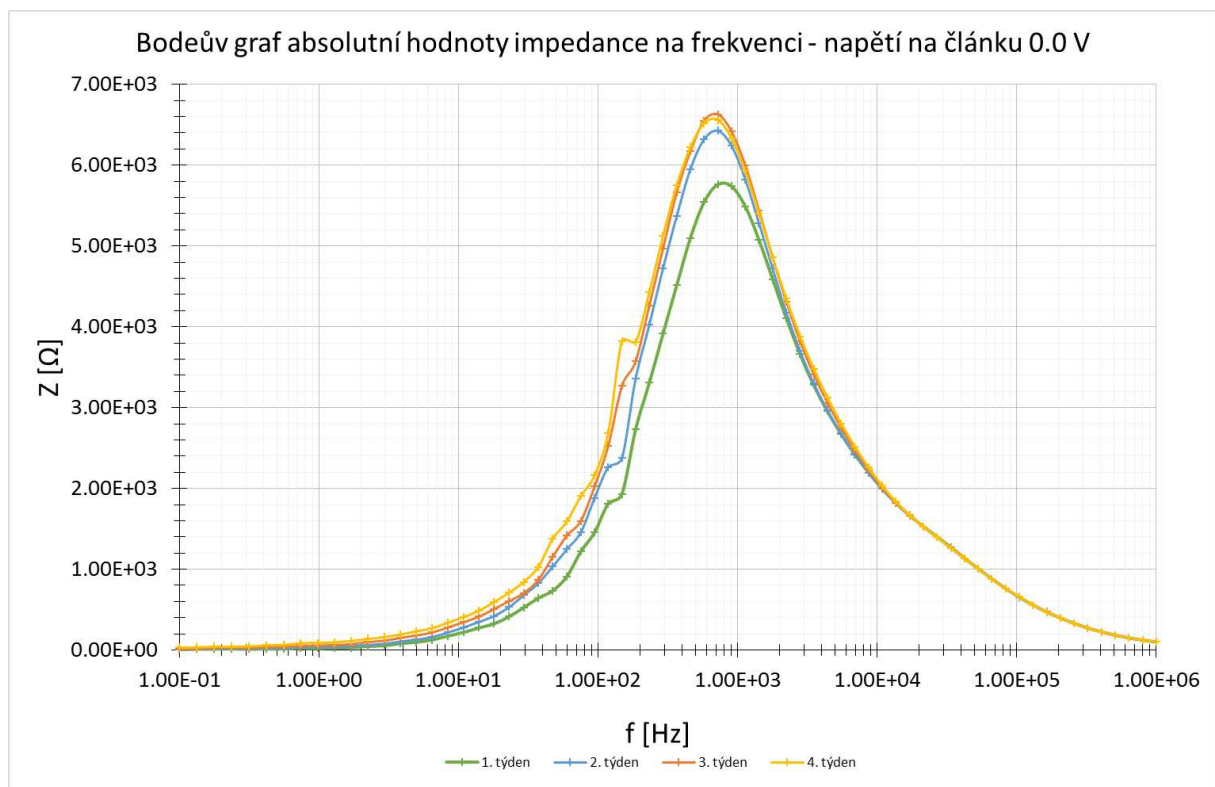


Graf 33 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,6 V, vzorek 5 elektroda 5

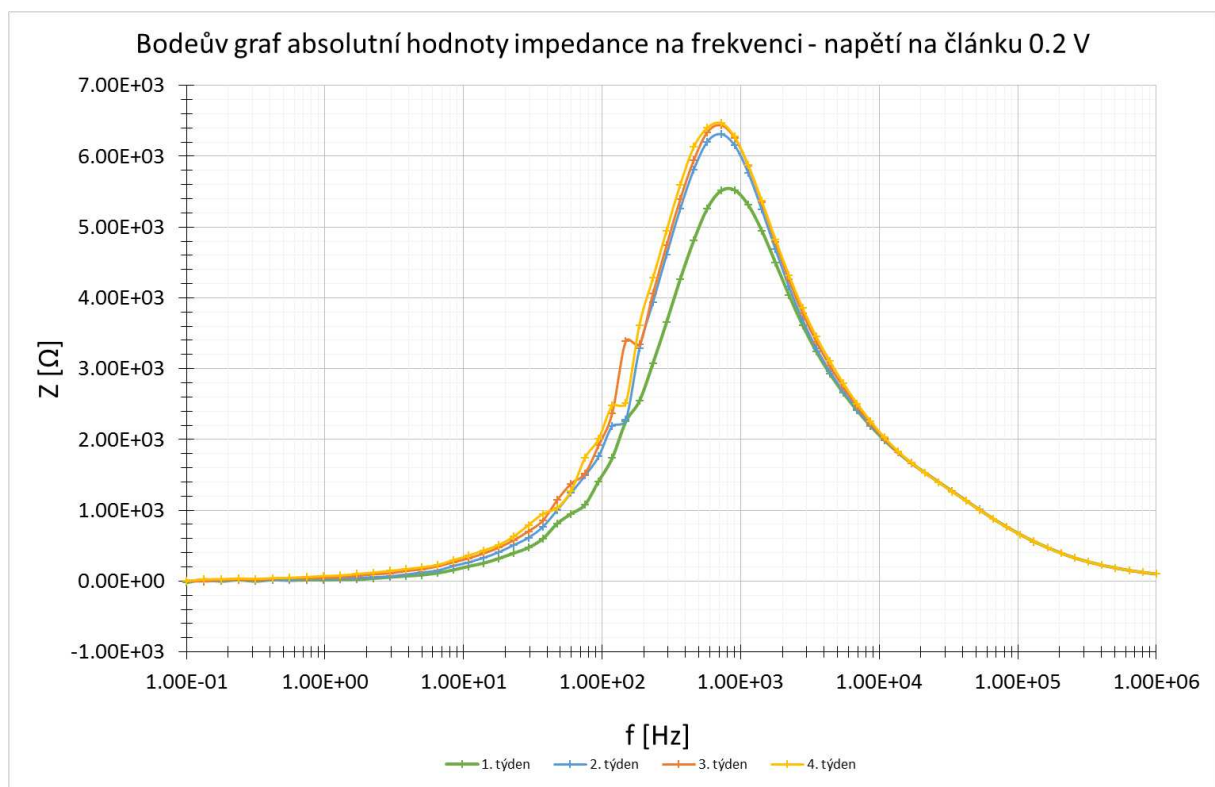


Graf 34 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,8 V, vzorek 5 elektroda 5

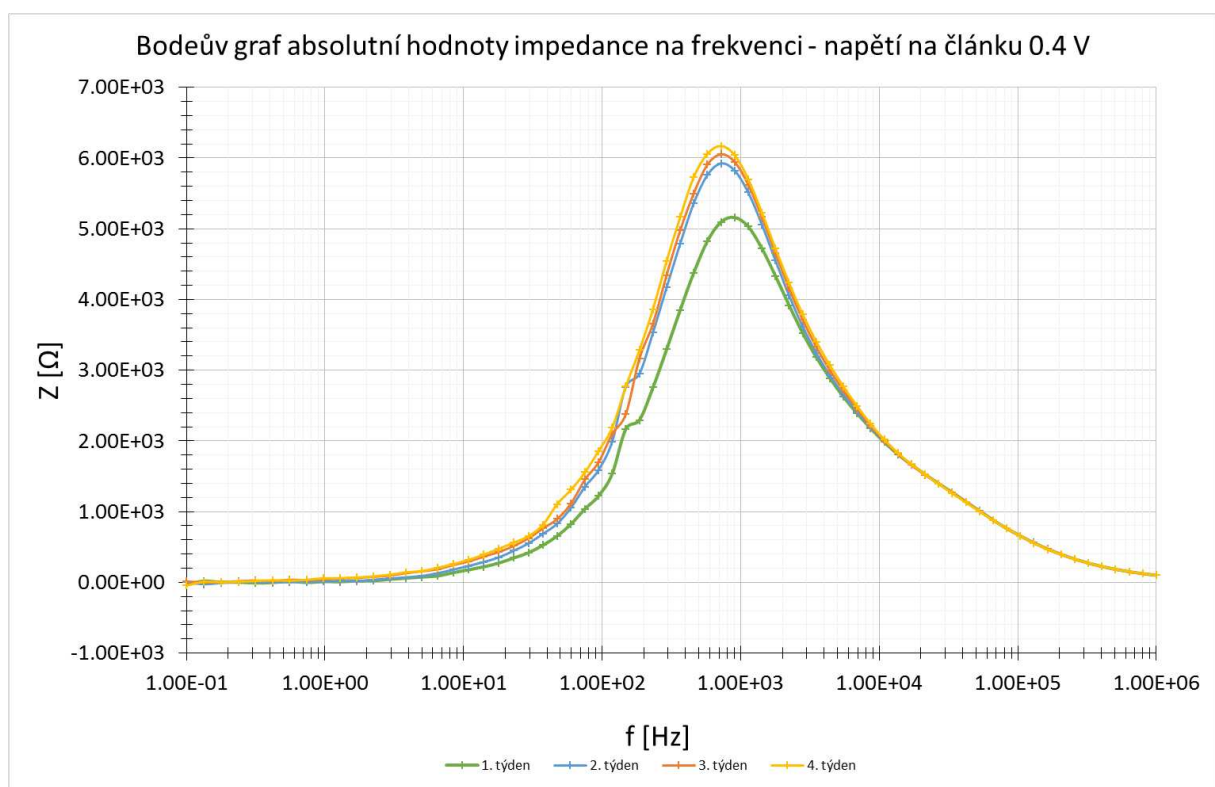
V předešlých grafech je patrné, že impedance s narůstajícím napětím na článku klesá. Naopak s časem impedance roste. U napětí na 0,8 V dochází s časem k jejímu poklesu. Tato situace je vzhledem k průběhu voltampérové charakteristiky v této oblasti očekávatelná.



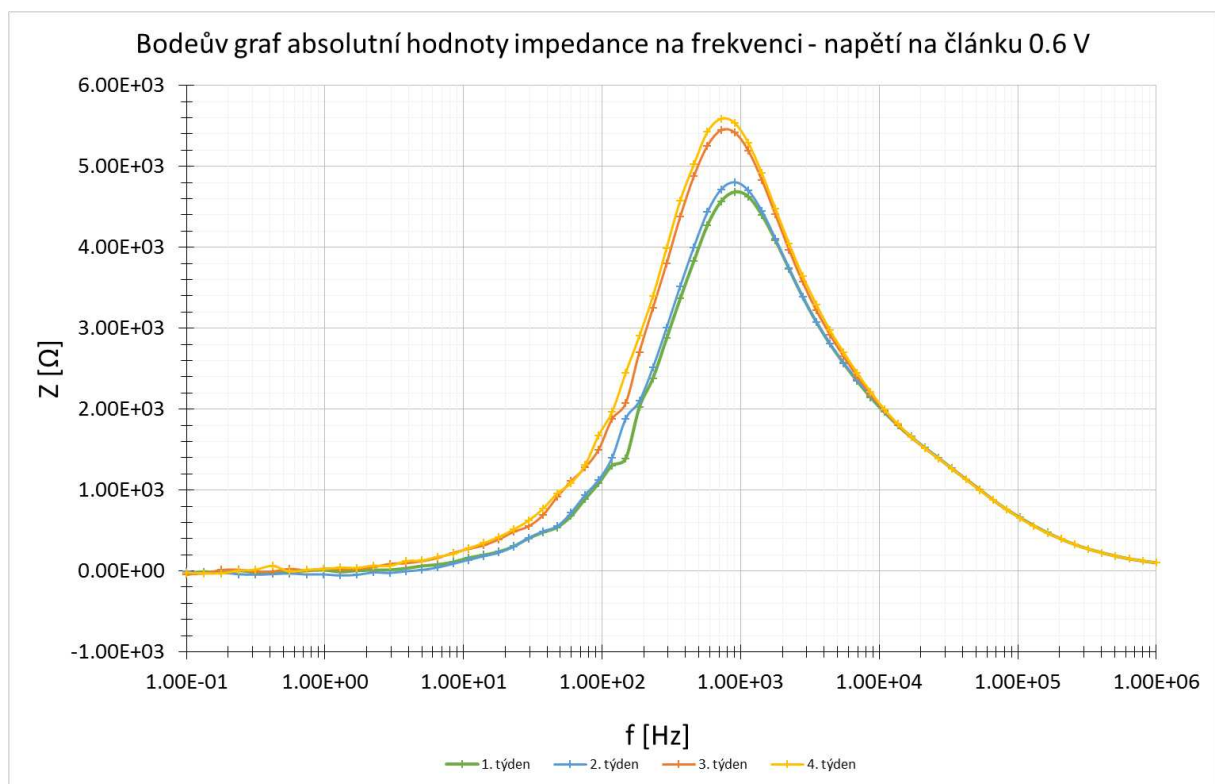
Graf 35 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,0 V, vzorek 5 elektroda 5



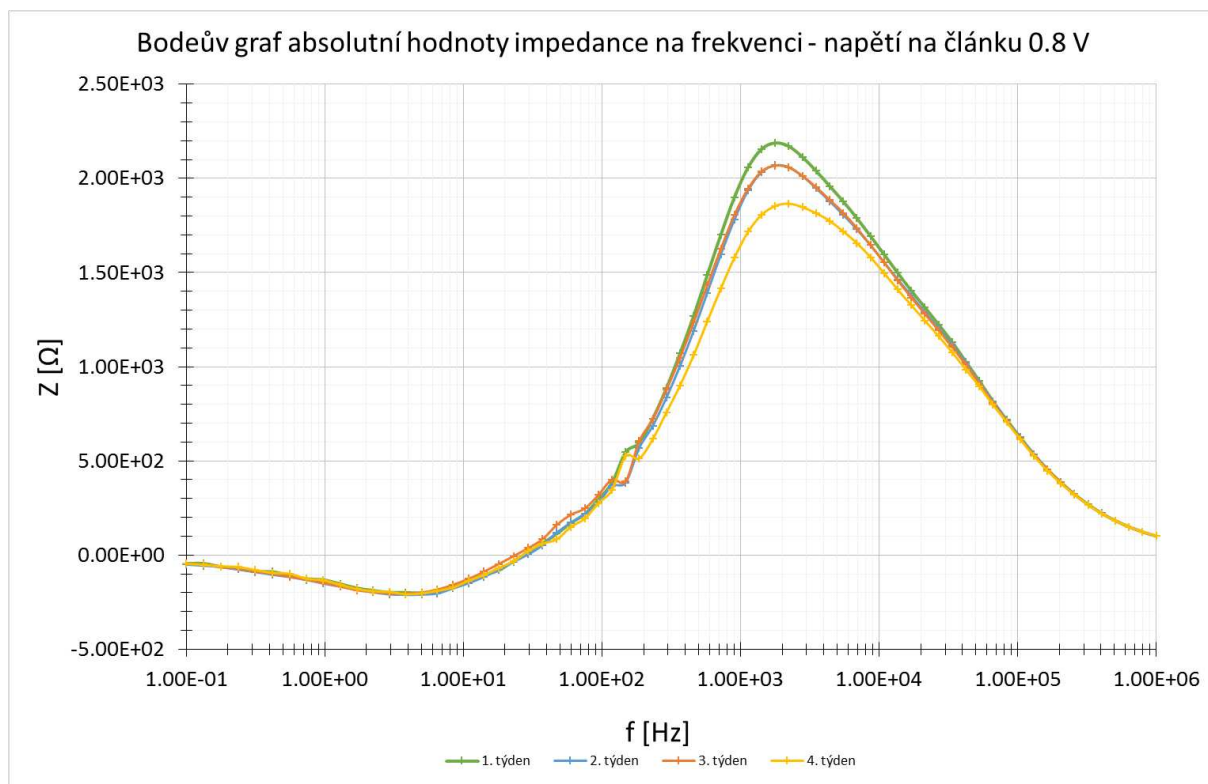
Graf 36 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,2 V, vzorek 5 elektroda 5



Graf 37 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,4 V, vzorek 5 elektroda 5



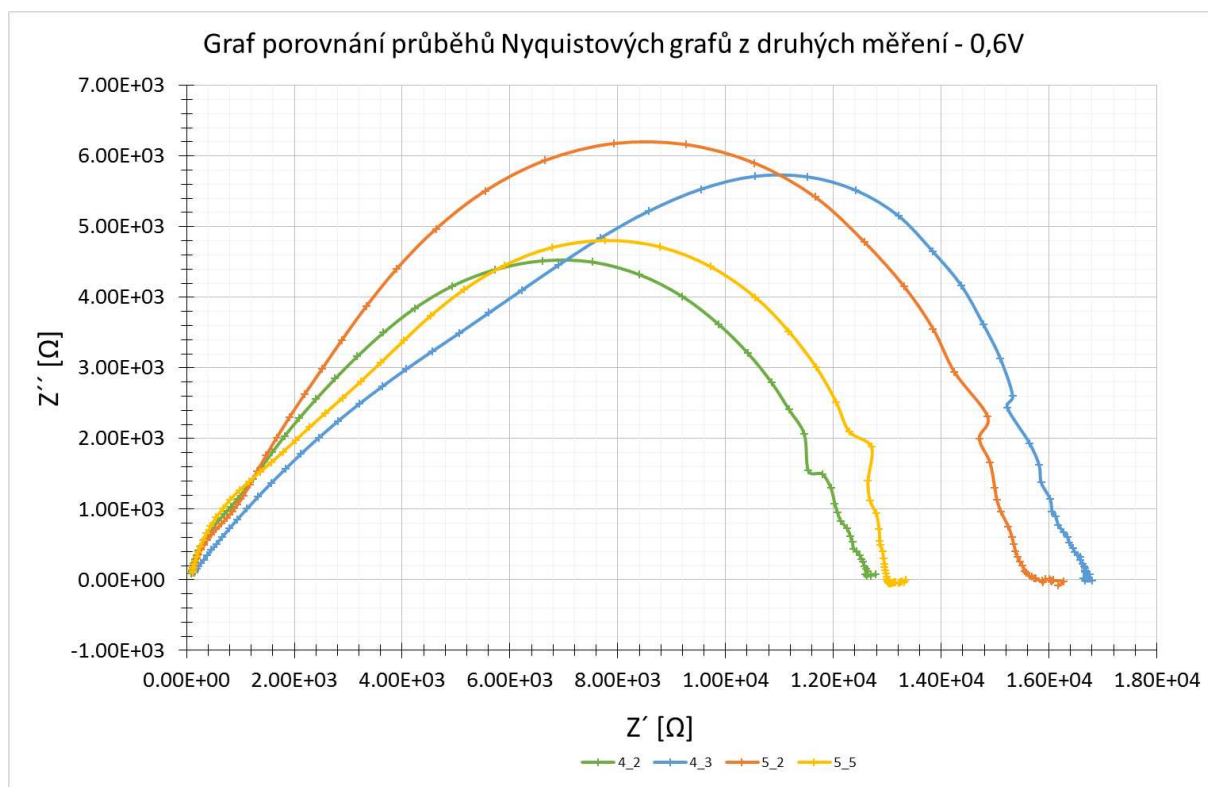
Graf 38 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,6 V, vzorek 5 elektroda 5



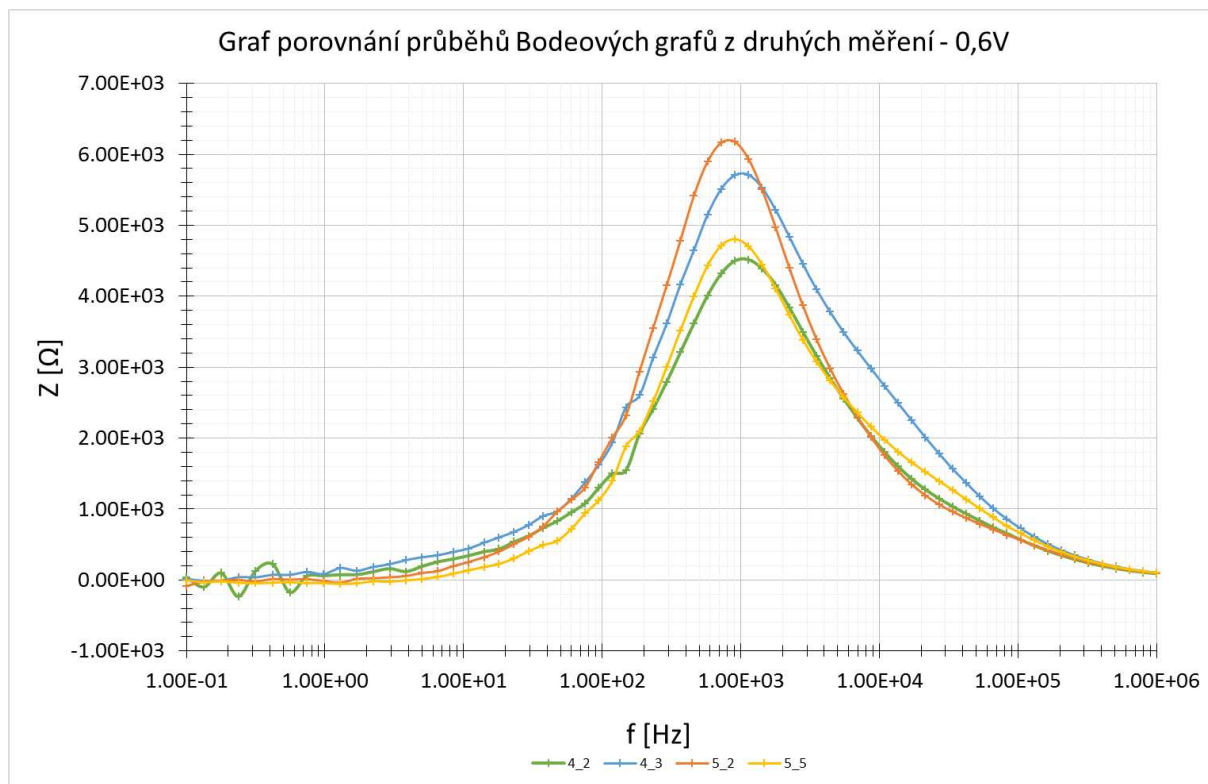
Graf 39 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,8 V, vzorek 5 elektroda 5

Průběhy Bodeových grafů jsou podobné, ale u napětí 0, 0,2 a 0,4 V dochází k výraznějšímu poklesu impedance při frekvenci okolo 1 kHz až při čtvrtém měření, na rozdíl od napětí 0,6 V, kdy dochází k poklesu při třetím měření (po dvou týdnech). Odlišná je situace při nastavení napětí na článku 0,8 V, kde je průběh celkově rozdílný a ke změně impedance dochází hned při druhém měření, třetí měření je s tímto měřením téměř totožné a při posledním měření došlo k dalšímu poklesu.

Níže jsou uvedeny grafy s porovnáním průběhů různých vzorků. Data pochází z druhých měření a byla naměřena při napětí na článku 0,6 V. První číslo značí vzorek, druhé elektrodu.



Graf 40 - Graf porovnání průběhů Nyquistových grafů z druhých měření - 0,6V

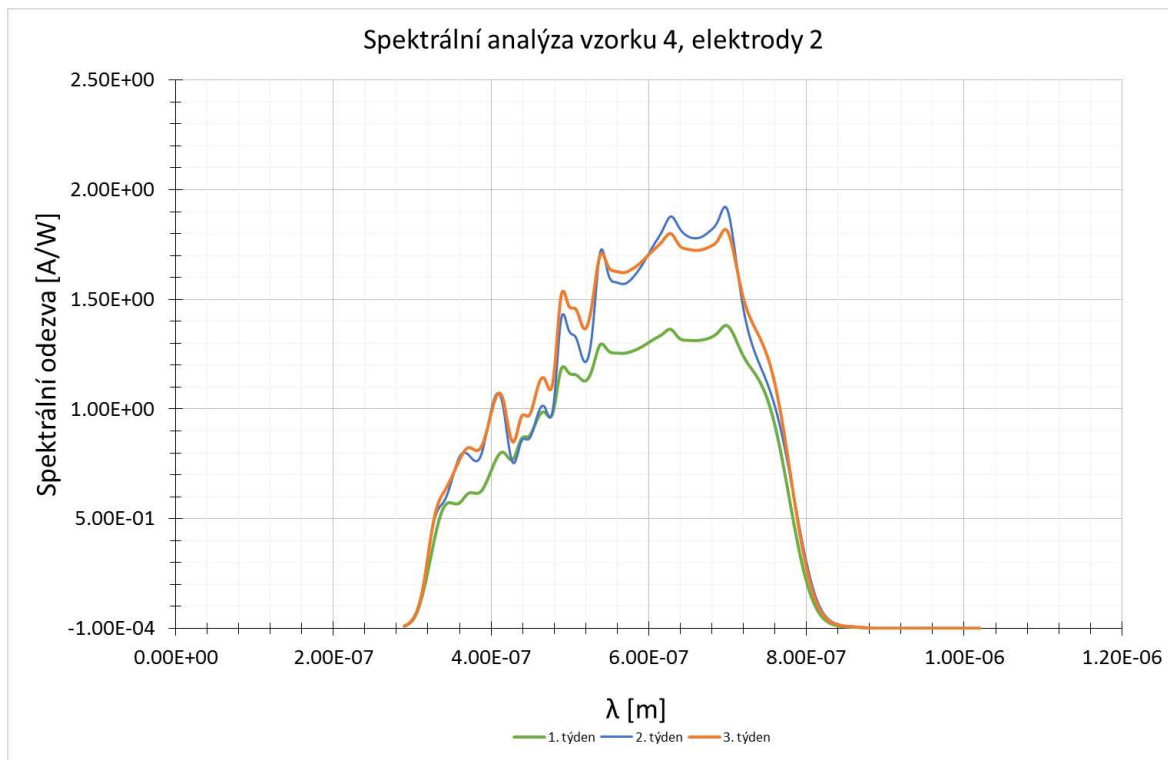


Graf 41 - Graf porovnání průběhů Bodeových grafů z druhých měření - 0,6V

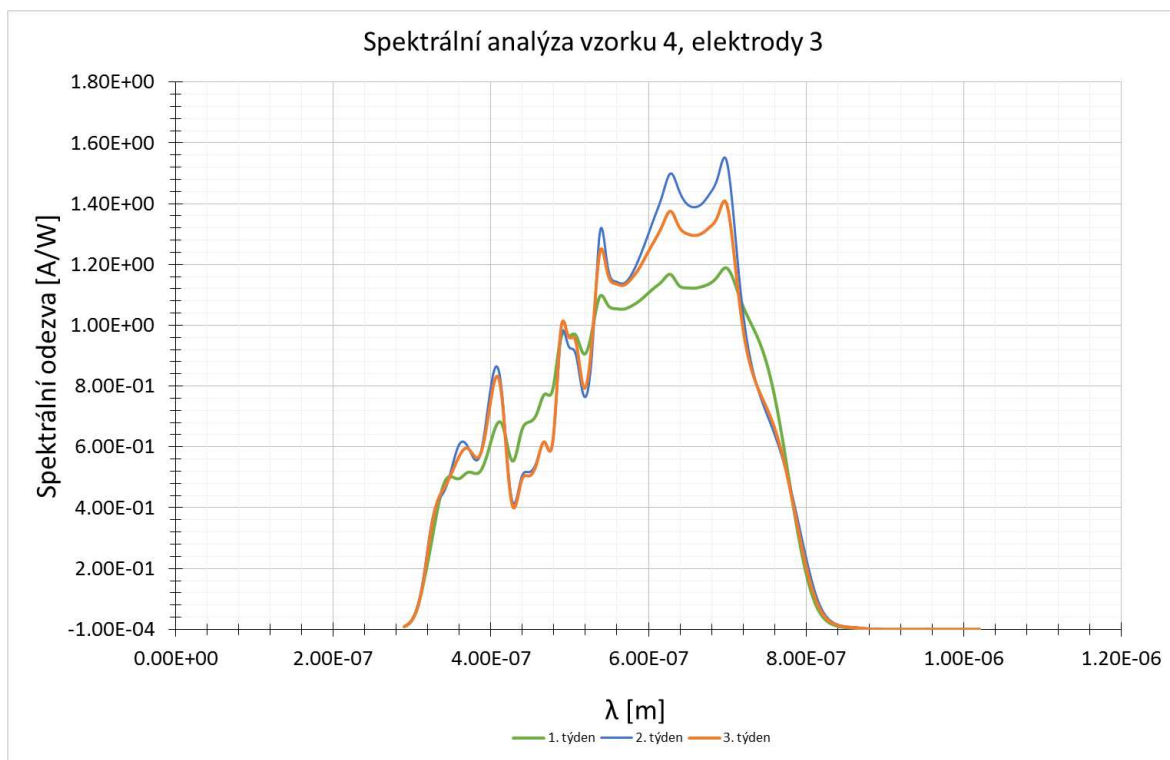
Z grafů je patrné, že impedance vzorků jsou velmi rozmanité.

2. 2. 5. Spektrální analýza

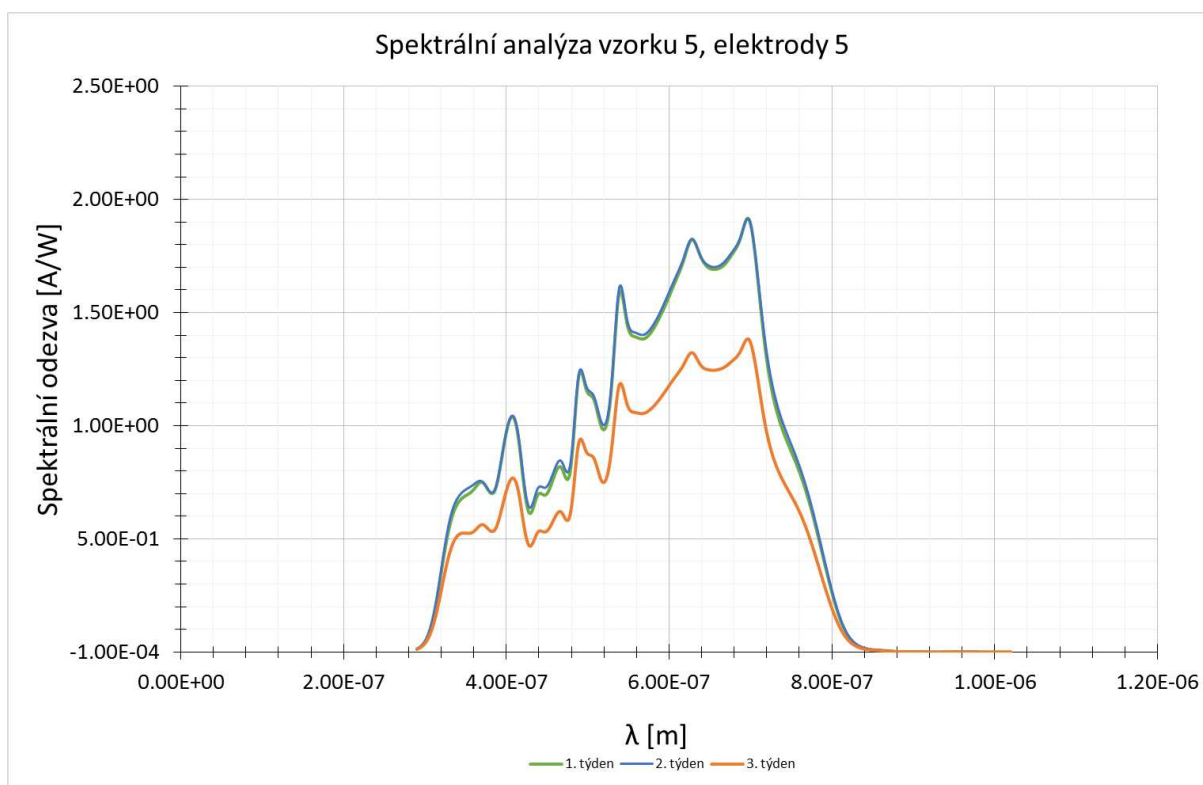
Tato metoda slouží pro zjištění reakce článku na záření o různých vlnových délkách. V řešeném případě šlo o měření v rozsahu od 290 do 1020 nm, což pokrývá oblast od ultrafialové po infračervenou.



Graf 42 - Spektrální analýza vzorku 4, elektrody 2



Graf 43 - *Spektrální analýza vzorku 4, elektrody 3*



Graf 44 - *Spektrální analýza vzorku 5, elektrody 5*

Z grafů spektrální analýzy je patrné, že k odezvě vzhledem k vlnové délce dochází hlavně ve vlnových délkách od cca 400 nm po 800 nm. Maximální odezvu pak způsobuje záření o vlnové délce cca 700 nm.

Vzhledem k časovému hledisku měření probíhaly změny v hodnotách naměřených u jednotlivých vzorků následovně. U vzorku 4 došlo u obou elektrod při druhém měření k poměrně velkému nárůstu. Při třetím měření došlo k dalšímu, ale již mírnějšímu nárůstu spektrální odezvy. U vzorku 5 nedošlo při druhém měření téměř k žádnému rozdílu. Při třetím měření došlo k poměrně výraznému poklesu spektrální odezvy.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo studovat změny vlastností perovskitových fotovoltaiických článků za dobu jejich života.

V úvodu diplomové je zpracována teoretická část zabývající se fotovoltaiickými články a perovskity. V této kapitole je stručná historie fotovoltaiiky, dělení a princip fotovoltaiických článků a veličiny u nich měřené. Dále je popsána struktura a vlastnosti perovskitů a perovskitové fotovoltaiické články.

V experimentální části jsou vyhodnoceny hodnoty naměřené přístrojem CIMPS. Pro experimentální část byly celkem vyrobeny tři sady vzorků. První sada vzorků však byla nefunkční a tak nejdelšímu časovému intervalu sledování byly podrobeny vzorky z druhé sady. Po této řadě byla vyrobena ještě jedna sada, u této však proběhla pouze dvě měření. Všechny sady byly vyráběny stejným postupem, avšak poslední sada byla vyrobena za použití námi namíchaného roztoku perovskitu.

Pro sledování vlastností vyrobených vzorků byly vybrány následující metody – voltampérová charakteristika, statické měření, dynamické měření a spektrální měření. U jednotlivých měření je popsán jejich význam.

Pro měření voltampérové charakteristiky byl použit zdroj se širokopásmovou bílou LED diodou. Voltampérová charakteristika byla proměřena v rozmezí $50 - 350 \text{ W/m}^2$. Nejvyššího výkonu bylo dosaženo u vzorku číslo 5 a elektrody 5, kde byl naměřen maximální výkon $399,5 \mu\text{W}$. Vzhledem k časovému hledisku došlo u vzorků nejprve k poklesu naměřených hodnot, poté došlo k jejich nárůstům. U vzorku 5, elektrody 5 byl u 2. měření zaznamenán pokles maximálního výkonu o 5,09 %, u 3. měření došlo k nárůstu oproti původní hodnotě o 3,66 % a u 4. měření byla hodnota maximálního výkonu o 11,72 % vyšší než hodnota původní. Pokud se ovšem podíváme na hodnoty vzorku 9 elektrody 2, tak zde je vidět rapidní pokles hned u druhého měření a to o 49,77 %.

U měření hodnot statické analýzy byl použit stejný zdroj jako u předchozího měření (tento zdroj byl použit také pro dynamická měření). Nejvyšších naměřených hodnot dosahoval při měření vzorek číslo 5 a elektroda 2. Časový průběh byl většinou podobný jako u voltampérové charakteristiky, nejprve došlo k poklesu naměřených hodnot oproti původním, poté došlo opět k jejich navýšení nad původní hodnotu.

Z hodnot naměřených pomocí metod IMPS a IMVS byly sestaveny dva typy grafů. První je graf Bodeův, na který byla vynesena absolutní hodnota veličiny v závislosti na frekvenci. Na druhý graf, Nyquistův, byla vynesena závislost imaginární složky veličiny na reálné části impedance. Na těchto grafech lze vidět, že odezva proudu spolu s rostoucí frekvencí klesá. U vzorku 5, elektrody 2 s časem k příliš velkým změnám nedocházelo, ale u elektrody 5 stejného vzorku docházelo s časem k navýšení hodnot proudové odezvy. Upravením grafů do Nyquistovi podoby byly zjištěny doby života nosičů náboje. Tyto časy se se stářím vzorků navyšovaly. U vzorku 5, elektrody 5, při osvětlení o intenzitě 350 W/m^2 došlo k navýšení již při měření po jednom týdnu a to z 14,6 ms na 18,9 ms. U elektrody 2 stejného vzorku došlo

k navýšení až po dvou týdnech, hodnoty byly ovšem stejné. Měření elektrody 2, vzorku 5 při intenzitě osvětlení 200 W/m^2 vykazovalo stejný průběh, ale hodnoty stouply z 18,9 ms na 24,5 ms.

Předposledním měřením, které bylo provedeno, bylo měření pomocí metody EIS. Na článek bylo postupně přiváděno napětí 0 až 0,8 V. Z Nyquistova grafu můžeme vyčíst, že s narůstajícím napětím na článku klesá impedance. Naopak s časem impedance článku roste, kdy při nulovém napětí na článku dochází k nárůstu impedance z $15 \text{ k}\Omega$ na $17,5 \text{ k}\Omega$, při napětí 0,2 V došlo k nárůstu z $14,5 \text{ k}\Omega$ na $17,5 \text{ k}\Omega$, při napětí 0,4 V se navýšila impedance z $14 \text{ k}\Omega$ na $16 \text{ k}\Omega$ a při napětí 0,6 V dochází k nárůstu z $12,5 \text{ k}\Omega$ na $15 \text{ k}\Omega$. Tento jev však nenastává při napětí na článku nastaveném na 0,8 V, kde impedance klesla ze $6,8 \text{ k}\Omega$ na $6,4 \text{ k}\Omega$. S časem tedy dochází k jejímu poklesu, který souvisí s polohou, ve které se nacházíme vzhledem k voltampérové charakteristice, a je tedy považován za očekávaný. U Bodeových grafů jsou průběhy grafů podobné, u napětí 0, 0,2 a 0,4 V dochází k výraznějšímu poklesu impedance při frekvenci 1 kHz při čtvrtém měření, při napětí 0,6 V dochází k poklesu na frekvenci 1 kHz při třetím měření. Pokud bylo na článku nastaveno napětí 0,8 V, pak došlo k poklesu impedance hned při druhém měření, třetí bylo téměř totožné a u čtvrtého došlo k dalšímu poklesu. Pokles absolutní hodnoty impedance byl u napětí na článku 0 V z $6,6 \text{ k}\Omega$ na $5,8 \text{ k}\Omega$, u napětí 0,2 V z $6,45 \text{ k}\Omega$ na $5,6 \text{ k}\Omega$, při napětí 0,4 V byl pokles z $6,2 \text{ k}\Omega$ na $5,2 \text{ k}\Omega$, pro napětí 0,6 V poklesla hodnota impedance z $5,6 \text{ k}\Omega$ na $4,6 \text{ k}\Omega$ a při napětí 0,8 V byl zaznamenán pokles z $2,4 \text{ k}\Omega$ na $1,8 \text{ k}\Omega$.

Pro měření spektrální analýzy byl použit zdroj s monochromatickými diodami, které umožňovaly proměřit spektrum článku od 290 do 1020 nm, což pokrývá jak ultrafialovou, tak infračervenou oblast. Z grafů lze vyhodnotit, že k největší odezvě dochází v oblasti od cca 400 do 800 nm, což je zhruba spektrum viditelného světla. Maximální odezvu článku pak způsobuje záření o vlnové délce cca 700 nm. Z časového hlediska vyhodnocení dat lze říci, že u vzorku číslo 4 došlo u obou elektrod při druhém měření k poměrně velkému nárůstu, navýšení postupovalo i při třetím měření, ale již nebylo tak markantní. U vzorku číslo 5 nedošlo při druhém měření téměř k žádnému rozdílu oproti prvnímu měření, ale při třetím měření došlo k poměrně velkému poklesu hodnot.

Vzhledem k časovému hledisku měření probíhaly změny v hodnotách naměřených u jednotlivých vzorků následovně. U vzorku 4 došlo u obou elektrod při druhém měření k poměrně velkému nárůstu a při třetím k dalšímu, ale již mírnějšímu nárůstu spektrální odezvy. U vzorku 5 nedošlo při druhém měření téměř k žádné změně, ale při měření třetím došlo k poměrně výraznému poklesu spektrální odezvy.

V diplomové práci byly tedy proměřeny vybrané vzorky. Tato měření byla vynesena do grafů a tyto grafy byly následně vyhodnoceny.

Použitá literatura

- [1] Fotovoltaické články - historie a současné trendy vývoje. *ASB-portal.cz: odborný stavební portál* [online]. 2010 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-asoucasne-trendy-vyvoje>
- [2] Solární (fotovoltaické) články. *Cez.cz: Fotovoltaika* [online]. 2006 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [3] Fotovoltaický panel. *Luxuselektro.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.luxuselektro.cz/product.php?id_product=1248
- [4] Fotovoltaická folie. *Stavebnictvi3000.cz - nejvíce informací o stavebnictví v ČR* [online]. 2010 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://www.stavebnictvi3000.cz/obr/xlarge/2010/9_fatra1_2.jpg
- [5] Přímá (i nepřímá) výroba elektrické energie. *Slideplayer.cz* [online]. 2010 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: http://images.slideplayer.cz/10/2799919/slides/slide_17.jpg
- [6] BECHNÍK, Bronislav. Nový rekord perovskitových fotovoltaických článků. *Tzb-info.cz: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 2015 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12250-novy-rekord-perovskitovych-fotovoltaickych-clanku>
- [7] Základní typy krystalových struktur. *Xray.cz* [online]. [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/kurs/struktury2.htm>
- [8] WIRTHOVÁ, Michaela. *Reologické vlastnosti gelů pro Pechiniho syntézy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Zmrzlý, Ph.D.
- [9] Perovskit. *Aldebaran.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_33/perovskit1.jpg
- [10] VOBORIL, David. Perovskitové FV články zaznamenávají rychlý pokrok ve zvyšování účinnosti. *Oenergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/perovskitove-fv-clanky-zaznamenavaji-rychly-pokrok-ve-zvysovani-ucinnosti/>
- [11] Perovskitový solární článek. *Aldebaran.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_33/cell.jpg
- [12] LUNGA, Jiří. *Příprava perovskitového solárního článku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2016. 43 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Kadlec.
- [13] KOPECKÝ, Dušan. Spin Coating. VŠCHT Praha, 2014. [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://ufmt.vscht.cz/>. Návod k laboratorní práci. VŠCHT Praha.

[14] AMEEN, Sadia a AKHTAR, M. Shaheer. Dalton Trans. 2015, **44**(14). DOI: 10.1039/c4dt03920c. ISSN 1477-9226. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4DT03920C>

[15] IMVS investigation on photovoltaic cell. Bio-logic.net [online]. 2010 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.bio-logic.net/wp-content/uploads/20100608-Application-note-30.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Fotovoltaický článek [2].....	9
Obrázek 2 - Fotovoltaický panel [3].....	10
Obrázek 3 - Fotovoltaická fólie [4]	11
Obrázek 4 - Trojvrstvý fotovoltaický článek [5].....	11
Obrázek 5 - struktura CaTiO_3 [7]	15
Obrázek 6 - Sedlový bod v perovskitech a definice i význam Kilnerova kritického poloměru r_{krit}	17
Obrázek 7 – Perovskit [9].....	18
Obrázek 8 - perovskitový solární článek [11]	18
Obrázek 9 - Struktura perovskitového solárního článku [12]	19
Obrázek 10 - Princip rotačního nanášení [13].....	21
Obrázek 11- Odvažování složek.....	22
Obrázek 12 - Složky potřebné pro namíchání roztoku perovskitu	23
Obrázek 13 - Smívání zbytků z lodičky do kádinky	24
Obrázek 14 - Míchání roztoku perovskitu.....	24
Obrázek 15 - Průmyslový roztok perovskitu.....	25
Obrázek 16 – Glovebox na CEITECu	26
Obrázek 17 - Sklíčka na vyhřáté ploténce.....	27
Obrázek 18 - Spincoater a rozmístění v gloveboxu	27
Obrázek 19 - Glovebox na chemické fakultě	28
Obrázek 20 - Spincoater se sklíčkem ve středu.....	29
Obrázek 21 - Čištění katodového pruhu.....	29
Obrázek 22 - Napařovací aparatura.....	30
Obrázek 23 - Výsledný perovskitový solární článek.....	31
Obrázek 24 - Právítko dodané spolu s přístrojem	32
Obrázek 25 - Výsledné zapojení pro měření	33
Obrázek 26 - Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 200 W – vzorek 5, elektroda 2.....	51
Obrázek 27 – CIMPS - Nyquistův graf závislosti imaginární složky proudu na reálné při 200 W – vzorek 5, elektroda 2	53
Obrázek 28 - CIMPS - Nyquistův graf závislosti imaginární složky proudu na reálné při 350 W – vzorek 5, elektroda 2	54
Obrázek 29 - CIMPS - Nyquistův graf závislosti imaginární složky proudu na reálné při 350 W – vzorek 5, elektroda 5	54

Seznam symbolů, veličin a zkratk

E_{PN}	Dopadající energie záření
η	Účinnost
P	Výkon
FF	Fill factor, faktor plnění
σ	Vodivost
CaTiO_3	Oxid titaničito-vápenatý
PbCl_2	Chlorid olovnatý
MAI	Methyl amonium jodid
PbI_2	Jodid olovnatý
OSPD	One-step Precursor Deposition, nanášení v jednom kroku
SDM	Sequential Deposition Method, způsob postupného nanášení
DSVD	Dual-Source Vapor Deposition, nanášení dvojitém napařováním
VASP	Vapor-Assisted Solution Process, napařovací proces
IMVS	Intensity modulated photovoltage spectroscopy, spektroskopie fotonapětí při modulované intenzitě
IMPS	Intensity modulated photocurrent spectroscopy, spektroskopie fotoproudu při modulované intenzitě
EIS	elektrochemická impedanční spektroskopie

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Typické hodnoty znečištění	13
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty VA při různých intenzitách osvětlení – starší vzorky	33
Tabulka 3 – Příklad naměřených hodnot VA při různých intenzitách osvětlení – novější vzorky.....	35

Seznam grafů

Graf 1 - Voltampérové charakteristiky	34
Graf 2 - Voltampérové charakteristiky 50 W – vzorek 5, elektroda 5	35
Graf 3 - Voltampérové charakteristiky 100 W – vzorek 5, elektroda 5	36
Graf 4 - Voltampérové charakteristiky 150 W – vzorek 5, elektroda 5	36
Graf 5 - Voltampérové charakteristiky 200 W – vzorek 5, elektroda 5	37
Graf 6 - Voltampérové charakteristiky 250 W – vzorek 5, elektroda 5	37
Graf 7 - Voltampérové charakteristiky 300 W – vzorek 5, elektroda 5	38
Graf 8 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 5, elektroda 5	38
Graf 9 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 4, elektroda 2	39
Graf 10 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 4, elektroda 3	40
Graf 11 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 5, elektroda 2	40
Graf 12 - Voltampérové charakteristiky 350 W – vzorek 9, elektroda 2	41
Graf 13 - Procentuální změna výkonu jednotlivých vzorků	42
Graf 14 - Graf proudové odezvy při rostoucí intenzitě záření	43
Graf 15 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0 V - vzorek 5, elektroda 5	44
Graf 16 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,2 V - vzorek 5, elektroda 5	44
Graf 17 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 5, elektroda 5	45
Graf 18 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,6 V - vzorek 5, elektroda 5	45
Graf 19 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,8 V - vzorek 5, elektroda 5	46
Graf 20 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 4, elektroda 2	46
Graf 21 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 4, elektroda 3	47
Graf 22 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 5, elektroda 2	47
Graf 23 - Proudová odezva v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0,4 V - vzorek 9, elektroda 2	48
Graf 24 - Porovnání proudové odezvy vzorků v závislosti na intenzitě záření při napětí na článku 0 V	49
Graf 25 - Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 200 W, neořezaný – vzorek 5, elektroda 2	50
Graf 26 - Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 350 W – vzorek 5, elektroda 2	51
Graf 27 – Bodeův graf závislosti napěťové odezvy na frekvenci při 350 W – vzorek 5, elektroda 2	52

Graf 28 – Bodeův graf závislosti proudové odezvy na frekvenci při 350 W – vzorek 5, elektroda 5	52
Graf 29 - Porovnání výsledků měření CIMPS 350 W, dosažených u různých vzorků	53
Graf 30 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,0 V, vzorek 5 elektroda 5	56
Graf 31 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,2 V, vzorek 5 elektroda 5	57
Graf 32 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,4 V, vzorek 5 elektroda 5	57
Graf 33 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,6 V, vzorek 5 elektroda 5	58
Graf 34 - Nyquistův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,8 V, vzorek 5 elektroda 5	58
Graf 35 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,0 V, vzorek 5 elektroda 5	59
Graf 36 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,2 V, vzorek 5 elektroda 5	59
Graf 37 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,4 V, vzorek 5 elektroda 5	60
Graf 38 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,6 V, vzorek 5 elektroda 5	60
Graf 39 - Bodeův graf závislosti imaginární složky na reálné - napětí na článku 0,8 V, vzorek 5 elektroda 5	61
Graf 40 - Graf porovnání průběhů Nyquistových grafů z druhých měření - 0,6V	62
Graf 41 - Graf porovnání průběhů Bodeových grafů z druhých měření - 0,6V	62
Graf 42 - Spektrální analýza vzorku 4, elektrody 2	63
Graf 43 - Spektrální analýza vzorku 4, elektrody 3	64
Graf 44 - Spektrální analýza vzorku 5, elektrody 5	64